

2.1/ INTRODUCTION

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé antérieurement au béton traditionnel. Il est tombé en désuétude, avec l'abondance des granulats du plus gros calibre permettant d'obtenir facilement des nouveaux élevés de résistances. Il retrouve cependant de nos jours un intérêt certain du fait des propriétés spécifiques de ce matériau, par rapport au béton traditionnel : excellente maniabilité et cohésion, bonne adaptation aux milieu fortement ferrailés, qualités esthétiques, etc. Par ailleurs, dans certaines régions riches en sable, il peut procurer des économies par rapport au béton traditionnel.

Dans ce chapitre on présentera un aperçu général sur les BS, ou on va exposer d'abord l'historique et l'origine des bétons de sable ainsi que leur définition et la différence entre les BS et les mortiers. Ensuite, on donnera une description des constituants entrant dans la fabrication, on décrit les propriétés mécaniques et hygrométriques, puis on explique le caractère non fissurant du BS. Finalement, on met en relief les innovations et les avantages apportés par les BS et on donnera quelques exemples de réparation structurale réalisés par ce matériau.

2.2/ ORIGINES DES BETONS DE SABLE

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le béton aggloméré confectionné par F.coignet dans le 3ème quart de XIX siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement a Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Said en Egypt (hauteur : 52m) et du pont de New-York [22].

Les premières tentatives de correction granulaire reste l'apanage de F.Coignet qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872, mélangea un sable fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction.

Cette technique a été mise au point depuis des décennies, en URSS, en témoignent les réalisation du port Kaliringrad en Prusse- Orientale en béton de sable au début du siècle et aussi du pont de Chernavskif coulé sur place à Voronej (500Km de Moscou) [23]. A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder a permit l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines : (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.).

2.3/ DEFINITION

Le béton de sable est un matériau constitué principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulats 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulats de faible diamètre $\varnothing < 10\text{mm}$

Une question pourrait se poser : quelle est la différence entre le béton de sable et le mortier ?

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton où le gros granulats est le sable ($D_{\text{max}} = 5\text{mm}$), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m^3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimale étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400 à 600) Kg/m^3 .

2.4/ LES COMPOSANTS DU BETON DE SABLE [24]

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants.....

2.4.1/ Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-540 et NF P 18-101 il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homogène, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

2.4.2/ Les fines d'ajout (filler)

La qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [24]:

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.

- L'énergie de mise en place.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Et ces fines sont du ciment, puisque la qualité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle bien connue de : $C = 550/\sqrt[5]{D}$ ou $C = 700/\sqrt[5]{D}$ (selon l'usage du béton). Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.

Tableau 2.1 : Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [24]

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	1.904	290	370	BETON
0/20	1.821	300	385	
0/16	1.741	315	400	
0/8	1.516	360	460	
0/6.3	1.445	380	480	
0/4	1.320	415	530	MORTIER
0/2	1.149	480	610	
0/1	1.000	550	700	

On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fumé de silice, pouzzolanes broyées...) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives....)

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 Kg/m³ et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influencer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

- la maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente :
- pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

Nous citerons deux types de fines (fillers) que nous allons utiliser dans notre étude : la fumé de silice (fines actives), et les fillers calcaire (fines inertes).

- ❖ Le terme filler fait référence à tout produit obtenu par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, bentonite, cendres volantes...) naturelles ou non.

Ce mot filler provient de l'anglais « **to fill** » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2mm.

L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage, . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration, . . .) [25]. L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

2.4.2.1/ Filler calcaire

Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif. Son avantage est sa finesse qui peut être utilisée pour optimiser la granulométrie de mélanges de béton. [26]

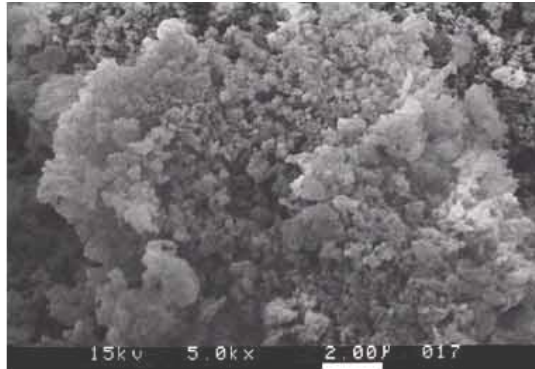
L'addition de filler calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fin, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable. Les fillers peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [25].

2.4.2.2/ Fumé de silice [5]-[26]

Les fumées de silice sont des résidus évacués de la chambre de combustion d'un four destiné à produire du silicium ou des alliages contenant du silicium. La fumée de silice se présente sous forme de microsphères de silice amorphe d'un diamètre moyen de l'ordre de 0,1 μm (Photos1-1), leur surface spécifique est de l'ordre de 20 à 25 m^2/g . Lorsque les microsphères sont bien dispersées, elles vont s'empiler dans les espaces interstitiels restés vides entre les grains de ciment qui possèdent un diamètre moyen environ 100 fois plus élevé. Ces fines particules améliorent les propriétés rhéologiques du mélange (fluidité, diminution de la ségrégation et du ressuage). Leur grande finesse et leur structure vitreuse en font un produit très réactif. Elles permettent aussi d'obtenir une pâte plus dense car le squelette granulaire est plus compact.

La grande finesse et surface spécifique des fumées de silice tendent à augmenter la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la même maniabilité qu'un béton sans fumée de silice. Cependant, en présence d'un superplastifiant et utilisées en petite quantité pour des bétons ayant un faible E/C , les fumées de silice peuvent augmenter quelque peu la quantité d'eau

libre dans le mélange de béton et accroître sensiblement la maniabilité . De plus, les fumées de silice augmentent la cohésivité du béton et diminuent donc le ressuage et la ségrégation.



Photos 2.1 : Microstructure du fumé de silice (forme sphérique)

L'utilisation de fumées de silice à des dosages de 7 à 15% par rapport à la masse de ciment, permet au béton d'atteindre des résistances mécaniques élevées, et permet aussi d'avoir des bétons plus denses et plus imperméables, donc plus durable. Cependant, étant donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectuée.

Par son effet filler et par la formation d'une phase liante, la fumée de silice contribue donc au renforcement des propriétés mécaniques du matériau durci. Les caractéristiques des interfaces pâte- granulat (zone de transition poreuse) en sont grandement améliorées : absence de cristaux de grandes dimensions et orientés, absence de concentration de fissures, meilleure cohésion et meilleure adhérence pâte -granulat. L'augmentation de la qualité des interfaces a un impact direct sur la microfissuration initiale et le processus de fissuration.

2.4.3/ Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu...et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. [24]

2.4.4/ L'eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18-303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables.

2.4.5/ Les adjuvants [5]-[24]

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires.

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage du plastifiants ou superplastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui ont été utilisés dans cette étude.

Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103.

- **Les superplastifiants [5]- [36]**

Les superplastifiants sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du polynaphtalène sulfoné, et les sels de sodium de la polymélamine sulfonée.

Les superplastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. Leur mode d'action principal est d'augmenter la maniabilité des bétons. Cependant, comme il est expliqué dans cette section, il est possible de les utiliser comme réducteurs d'eau afin de diminuer le rapport E/C et d'ainsi augmenter la résistance en compression des bétons avec tous les bénéfices que cela comporte. L'utilisation de superplastifiant permet d'abaisser la teneur en eau de 10 à 30% tout en maintenant une même maniabilité.

2.4.6/ Autres ajouts

2.4.6.1/ Les fibres [24]

Elle sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout.

On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe.

- **Les fibres polypropylènes** [37]

Les fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui, une fois dans le malaxeur, se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus courantes varient de 10 à 50mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns.

Les fibres polypropylènes améliorent la résistance aux chocs, à l'écaillage et limitent les risques de fissuration dus au retrait dans les premiers âges du béton. Par ailleurs leur ajout ne diminue pas la maniabilité du béton mais au contraire aurait tendance à l'améliorer.

Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les plus courtes étant choisies pour des micro- bétons, les plus longues pour ceux dont le « D » est important. Les quantités à mettre en œuvre sont de l'ordre de 0.5 Kg jusqu'à un maximum de 2 Kg par m³ de béton, soit entre 0.05 et 0.2% en volume. Dans la majorité des cas les dosages habituels sont de 600 g/m³ ou 900g/m³ et très rarement 1200 g/m³.

2.4.6.2/Les gravillons [24]

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70.

$$G/S < 0,70$$

2.4.6.3/ Les colorants [24]

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps.

2.5/ PROPRIETES DES BETONS DE SABLE

Un concepteur qui retient le béton de sable comme matériau pour un élément de construction a une démarche de « pensée béton », c'est-à-dire qu'il adopte un matériau répondant aux critères qui ont permis le succès du béton, en termes de performances et durabilité, mais aussi d'image et de comportement.

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. La maniabilité dépend non seulement du rapport E/C, mais aussi du module de finesse de sable, et elle dépend surtout du type et de la teneur en fines d'ajouts. Nous avons vu qu'il nécessite plus d'eau qu'un béton classique. D'autre part, il apparaît évident que le mélange ciment- sable présentera une porosité plus élevée que la porosité du béton traditionnel. Cet inconvénient est compensé par l'ajout de fines de bonne nature pour améliorer la compacité. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granululaire. Il s'agit de trouver un compromis entre la maniabilité du béton et sa compacité [27].

2.5.1/ Résistance et maniabilité

Les bétons de sable se situent vers les bétons dont les usages requièrent une bonne ouvrabilité. Les bétons de sable peuvent même autoriser des ouvrabilités qu'un béton traditionnel ne permet pas d'atteindre. Ce raisonnement reste évidemment très schématique, car il est clair que les progrès dans les techniques d'adjuvantation, de composition, de traitement et de fabrication des béton permettent aujourd'hui de proposer des bétons de gravillons à hautes performances mécaniques présentant de bonne maniabilités. De même si on fabrique des bétons de sable très maniables possédant d'excellentes performances mécaniques.

Les dosages en ciment de ces bétons sont de l'ordre de 250 à 450 Kg/m³, la compacité optimale est atteinte par adjonction des fines et de plastifiant. La résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60MPa selon la composition [28].

2.5.2/ Granulométrie- Résistance [24]

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres :

- ❖ **La finesse de l'addition** : plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc en gain de résistance ; ce résultat est valable quelque soit la granulométrie du sable. (Figure 2.1)
- ❖ **La nature de l'addition** : l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler : si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.
- ❖ **La dimension du D_{max} ($0/D$)** :

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate (figure 2.2) que l'effet du diamètre Dmax est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulu.

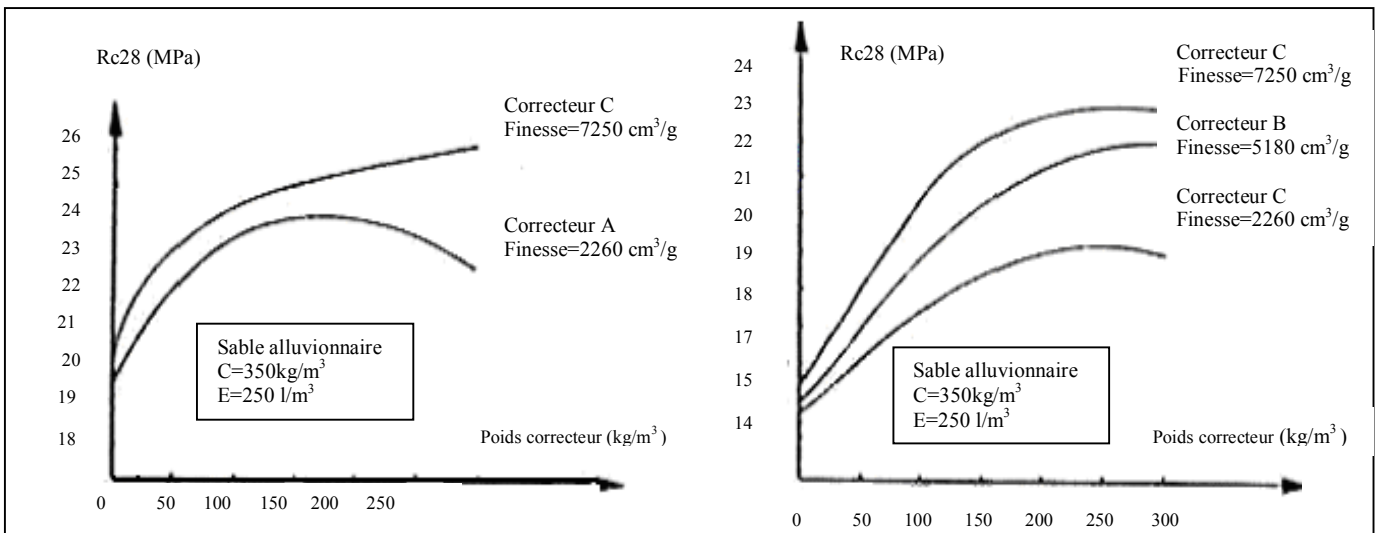


Figure 2.1 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [24]

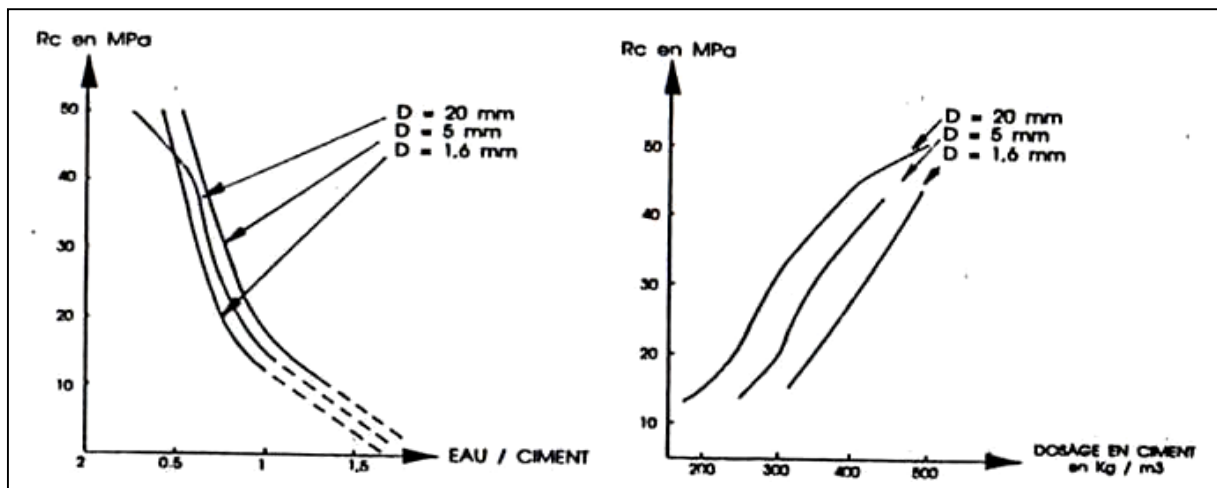


Figure 2.2 : Effet de la granularité sur la résistance [24]

2.5.3/ Durabilité

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques.....etc, c'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité. Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

Enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la Vanne, phare de Port –Said en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro a Paris, etc. [27]

2.6/ FORMULATION DES BETONS DE SABLE

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques. Les bétons de sables font partie de ces nouveaux bétons aux propriétés spécifiques intéressantes (fine granulométrie, ouvrabilité....), pour lesquels la démarche de formulation demeure très empiriques [29].

- **Méthode de formulation des bétons de sable** [27]

Partant d'un sable donné et d'un dosage en ciment fixé à priori, l'essentiel de l'étude consistera à définir la quantité d'ajout (généralement des fines) pour obtenir la compacité et la résistance optimale (figure2.3)

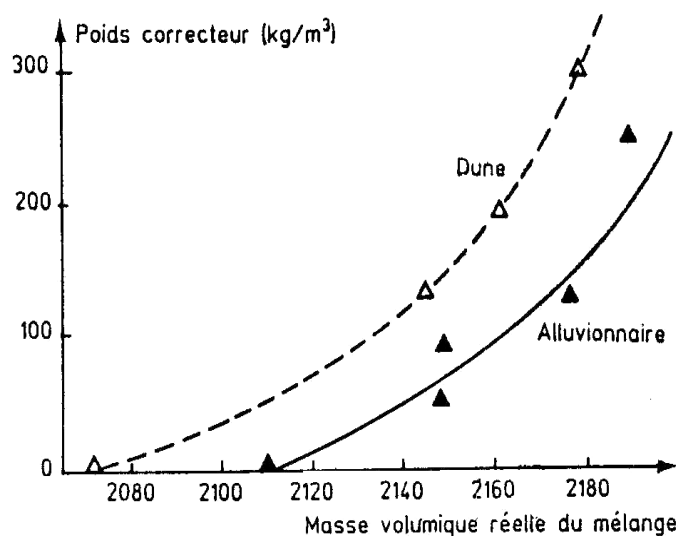


Figure 2.3 : Evolution de la compacité en fonction du dosage en fines pour deux types de sable [27]

Ce dosage peut éventuellement être étudié sur mélange sec ; il va dépendre de la nature et de la granularité respectives du sable et des fines d'ajout.

Le gain de densité s'accompagne d'un gain de résistance, mais ce dernier dépend d'autres paramètres, en particulier de la finesse de l'ajout et de sa nature chimique qui peut lui conférer une certaine pouzzolanicité.

On peut également créer des synergies par l'emploi dans la même formulation de différents ajouts : adjuvant et fines de différentes natures (tableau 2.2 et figure 2.4 et 2.5)

Tableau 2.2: Amélioration d'un béton de sable par ajouts successifs avec un dosage en ciment 350Kg/m³ [27]

Ajout Formule	0	1	2	3	Rc (MPa)
	Sable fin	fines	adjuvant	Fumées de silice	28 jours
P ₀	X	////////////////////	////////////////////	////////////////////	10,30
P ₁	X	X	////////////////////	////////////////////	17,60
P ₁₊₂	X	X	X	////////////////////	21,0
P ₁₊₂₊₃	X	X	X	X	31,70

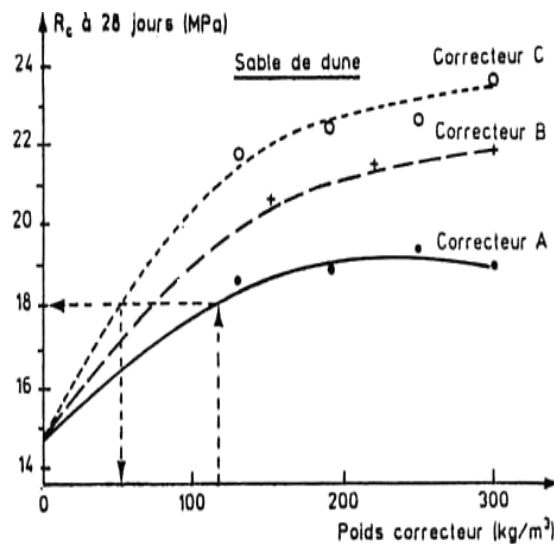


Figure 2.4 : Effet du dosage et de la finesse d'un correcteur calcaire même dosage en ciment

Finesse C > finesse B > finesse A [27]

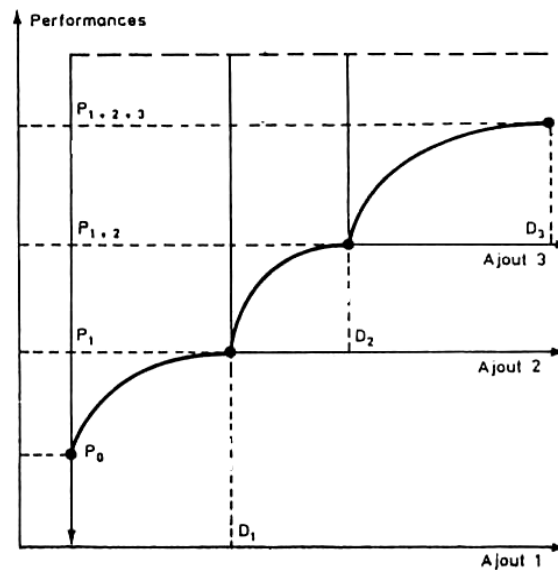


Figure 2.5 : Amélioration des résistances par synergie de différents ajouts
 $P \uparrow$ = résistance, compacité, module...../ $P \downarrow$ = fluage, retrait..... [27]

Un gain appréciable de résistances peut être atteint par l'emploi de plastifiants qui permettent de réduire la quantité d'eau : celle-ci reste cependant plus importante que dans un béton classique ; des rapports (E/C) compris entre 0.60 et 0.70 sont habituels. L'utilisation d'adjuvants fluidifiants et l'ajout d'ultrafines telles que les fumées de silice permettent d'atteindre des résistances plus élevées et d'étendre le domaine d'application des bétons de sable aux bétons classiques.

On peut également augmenter la compacité par emploi de gravillons (béton de sable chargé). L'intérêt de tel ajout, tout en augmentant les performances en résistance, serait d'améliorer le comportement de fluage. [27]

Z. Boudaoued [30] a formulé un béton de sable (sable fin de Bousaada) en fixant la quantité de ciment 350 Kg/m^3 , et il a déterminé la quantité de sable en supposant un coefficient de compacité du mélange égale a **0.75**, [28]-[30], ($V_s + V_c = 0.75 \times 1000 = 750\text{L}$), après calcul il a fixé la dépense en sable à 1660 Kg/m^3 . Le dosage en eau est déterminé après fixation de la maniabilité, ce qu'il a donné un rapport E/C= 0,86. Avec cette formulation de base, **Boudaoued** a introduit deux types de filler calcaire ($\varnothing < 125\mu\text{m}$), afin de remplir et corriger les dépenses en sable (compacité), et pour voir leur effet sur les caractéristiques mécaniques du B.S, il a substitué et remplacé à chaque fois une quantité de sable par du filler calcaire, tout en corrigeant les dépenses en sable et en filler.

Les résultats d'essais de résistance à la compression à 28 jours pour cette formulation de BS avec ajout fillers ont donné des valeurs maximales avec des dosages de 200 Kg/m^3 pour les deux types de fillers calcaires.

Autre travaux on été réalisés [31] avec du sable de dune (Biskra) et avec du filler de polissage de carrelage, en suivant la même démarche de formulation, on a trouvé avec un dosage similaire de 200 Kg/m^3 des valeurs optimales à la résistance à la compression à 28 jours.

2.7/ DEFORMATION DES BETONS DE SABLE

Des travaux de recherches ont été effectués sur les bétons de sable, afin d'étudier leur comportement au fluage et au retrait [32].

A.Benaissa, P.Morlier, C.Viguié ont présenté une étude de recherche comparative faite parallèlement, sur un BS et un BO de même niveau de résistance à la compression à 28 jours. Les compositions du BS et BO qui ont été étudié et leurs caractéristiques mécaniques sont présentés au tableaux : (2.3 et 2.4) ci-dessous.

Tableau 2.3 : Composition des bétons d'essais (BS-BO) [32]

Composition	Sable de Garonne roulé- sélicieux (Kg)	Ciment CPJ 45 R PM (Kg)	Filler MEAC (Kg)	Superplastifiant (L)	Eau (L)	Granulats Kg/m^3	
						3/8	8/15
BS	1550	350	200	7	190	/	/
BO	680	320	/	/	170	450	770

Tableau 2.4 : Caractéristiques mécaniques des bétons d'essais (BS-BO)[32]

Sollicitation	Bétons	Age (jours)				
		3	7	14	28	90
R_c (MPa)	BS	11	17	21.5	23.6	28.8
	BO	14	20	25	26	29
R_t (MPa) (Fendage)	BS	1.24	1.97	2.24	2.36	2.53
	BO	2.02	2.13	2.14	2.51	2.90
E (MPa)	BS	17000	19700	/	23000	23000
	BO	21000	27900	/	31000	32500

D'après Benaïssa [33], le module d'élasticité du béton de sable qui est relativement faible implique une plus grande déformabilité que dans les bétons ordinaires et donc un moindre risque de fissuration. L'absence de gros granulats et aussi un facteur atténuateur de fissuration qui confirme le caractère peu fissurant du matériau.

A.Benaïssa [33] a constaté aussi d'après les observations effectuées au MEB que le béton de sable est un matériau amorphe et homogène.

2.7.1/ Le retrait des bétons de sable [28]

Le retrait d'auto- dessiccation (retrait endogène), présenté par la figure (2.6) est caractérisé par une cinétique semblable aux autres gammes de béton ordinaires. La différence de retrait de dessiccation ou de séchage s'explique par une perte en poids plus rapide pour le béton de sable que celle du béton ordinaire. Le retrait de dessiccation est une fonction croissante du taux de séchage. La figure (2.7) [22]-[28] montre la linéarité existante entre le retrait total et le taux de séchage, ce dernier étant pris comme le rapport de la perte de poids d'eau initial. L'aspect de la droite reste assez régulier, alors qu'on aurait pu s'attendre à un changement de pente en raison d'éventuelles fissures apparaissant au-delà d'un certain degré de séchage, mais ce n'est point le cas. Cette régularité de pente traduit une bonne homogénéité du béton et donc une absence de fissuration susceptible qui ne peut s'expliquer que par un séchage uniforme. Afin de vérifier cette hypothèse, A.Benaïssa a fait analyser au banc gamma (étude gammamétrique : perte de densité en fonction du temps et de l'épaisseur) une éprouvette de béton de sable dont les faces planes ont été rendues étanches subissant un séchage radial. Il a affirmé que l'uniformité du séchage et l'homogénéité du béton de sable, sont les facteurs déterminants l'absence de fissures. Cet état explique, au moins partiellement, le retrait de dessiccation du béton de sable plus important que celui du béton ordinaire. [22]-[28]-[32]

A.Benaïssa, P.Mollier, C.Viguiet et Chauvin en concluent que si la présence de fissures réduit le retrait, ceci n'est pas en soit un avantage car la fissuration peut exposer dangereusement la durabilité du matériau, donc ils affirment que le BS pour peu que sa perméabilité soit faible, présente une meilleure résistance aux milieux agressifs. De plus ils pensent que la déformation de retrait de dessiccation du BS se stabilise plus rapidement que celle du BO ou la stabilisation est éloignée dans le temps de sorte que les écarts à très long terme s'atténuent. Cette hypothèse est non seulement justifiée par le séchage plus rapide du béton de sable, mais aussi par la porométrie de ce matériau.

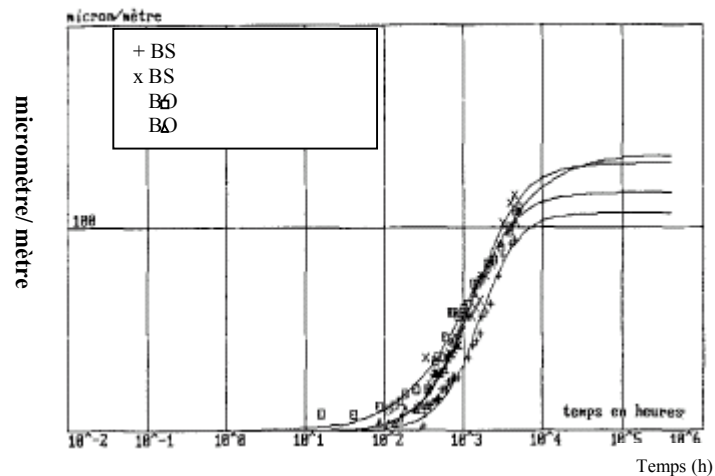


Figure 2.6 : Retrait d'auto-dessiccation (BS-BO) [32]

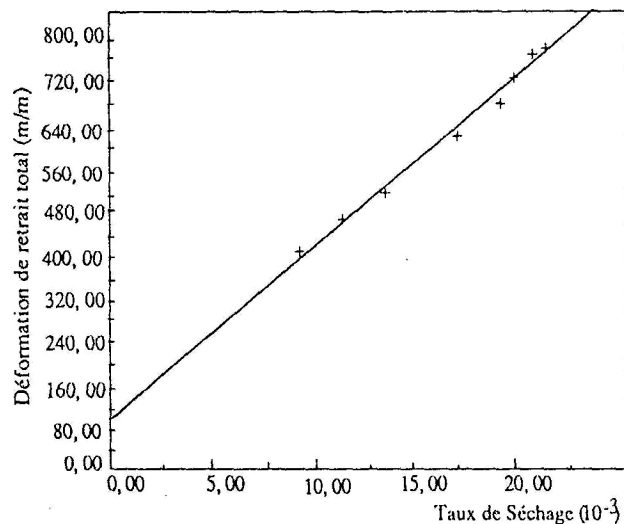


Figure 2.7 : Retrait total en fonction du taux de séchage BS [22]

La réaction d'hydratation est stoppée plus rapidement dans le béton de sable car les produits d'hydratation ne trouvent pas suffisamment d'espace dans les micro-pores, alors que dans le béton ordinaire, ces réactions puisent dans l'espace des macro-pores. Cette hypothèse est vérifiée par les travaux de nombreux chercheurs [28].

2.7.2/ Comportement des bétons de sable au fluage [32]

A. Benaïssa [32], a étudié le comportement des bétons de sable au fluage, ou il les a comparé avec les bétons ordinaires. Il a trouvé que le fluage de dessiccation est une fonction croissante de la perte en poids. C'est-à-dire que cette déformation est d'autant plus forte que la quantité d'eau évaporable est grande; d'ailleurs, les courbes de fluage de dessiccation varient

bien dans le sens de variation des courbes de pertes en poids (Fig. 2.8). Les cinétiques du fluage propre des deux bétons (BS et BO) (fig.2-9) manifestent quelques différences pendant les vingt premiers jours. Au-delà, l'écart de développement des taux de déformations entre les deux bétons s'atténue peu à peu pour s'annuler (fig.2-10).

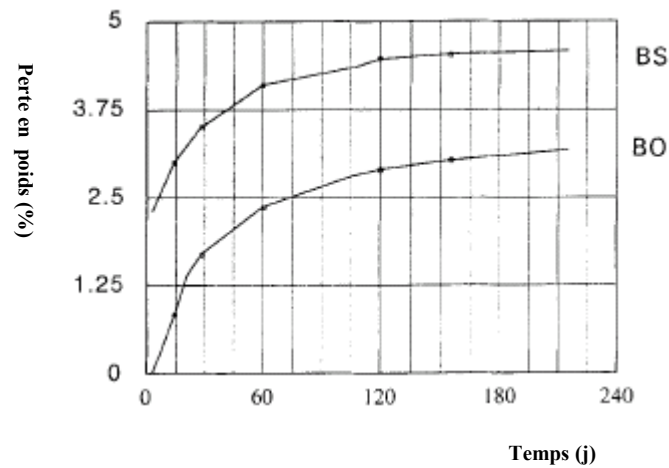


Figure 2.8: Evolution de la perte en poids (%) dans le temps (jours) [32]

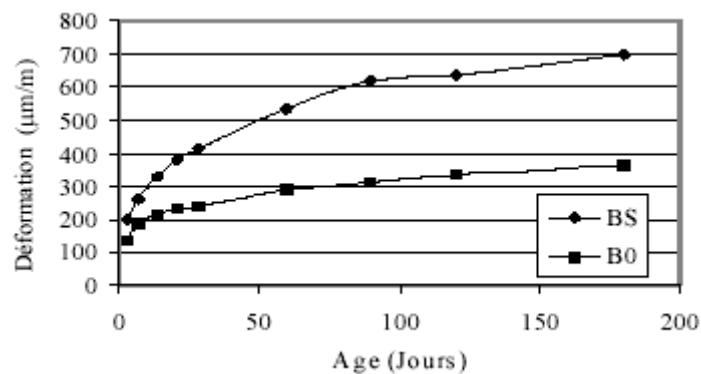


Figure 2.9 : Fluage propre (BS et BO) [34]

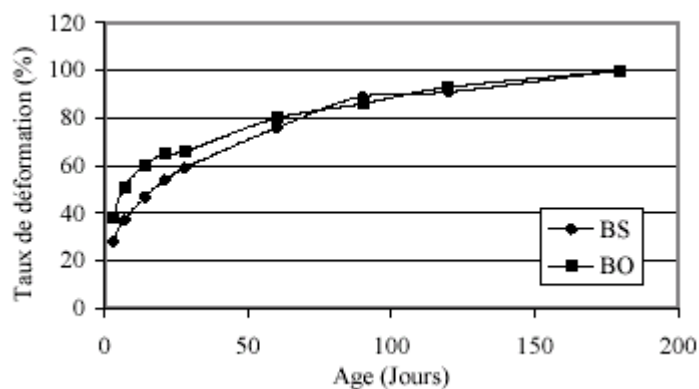


Figure 2.10 : Taux de déformation du fluage propre (BS et BO) [34]

A.Benaïssa a essayé d'expliquer avec son modèle physique figure (2.11) [34] l'écart entre les fluages propres du BS et BO, c- à -d l'espace offert à la migration d'eau dans le béton de sable étant plus réduit que dans le béton ordinaire en raison d'une fissuration moins importante. Par ailleurs, ce modèle illustre comment l'importance de la densité de fissuration du B.O par rapport à celle du B.S, d'une part et la quantité d'eau migrant vers les microfissures est plus importante que dans le B.O d'autre part, sont à l'origine d'une amplitude du fluage propre du B.S plus importante que celle du B.O. Le départ de l'eau sous chargement entraîne une refermeture de ces fissures proportionnellement plus importante dans le béton de sable et donc un fluage propre plus grand en amplitude que celui du béton ordinaire. A.Benaïssa a constaté une remarque importante est l'existence d'un fluage de dessiccation important en dépit d'un état très peu fissurant.

On a montré aussi que le béton de sable est un matériau homogène, d'où la nature du séchage est uniforme, au contraire au béton classique où elle est non uniforme. Cette cinétique particulière de la dessiccation du béton de sable, explique le caractère non fissurant du matériau. A.Benaïssa a trouvé que la fissuration du BO est le résultat de gradients de traction liées au séchage non uniforme qui est à l'origine de gradients hydriques. Mais le matériau BS est peu ou pas fissurant, grâce aux gradients hydriques qui sont négligeables, implique un séchage uniforme, et c'est la porométrie fine du matériau BS qui est à l'origine.

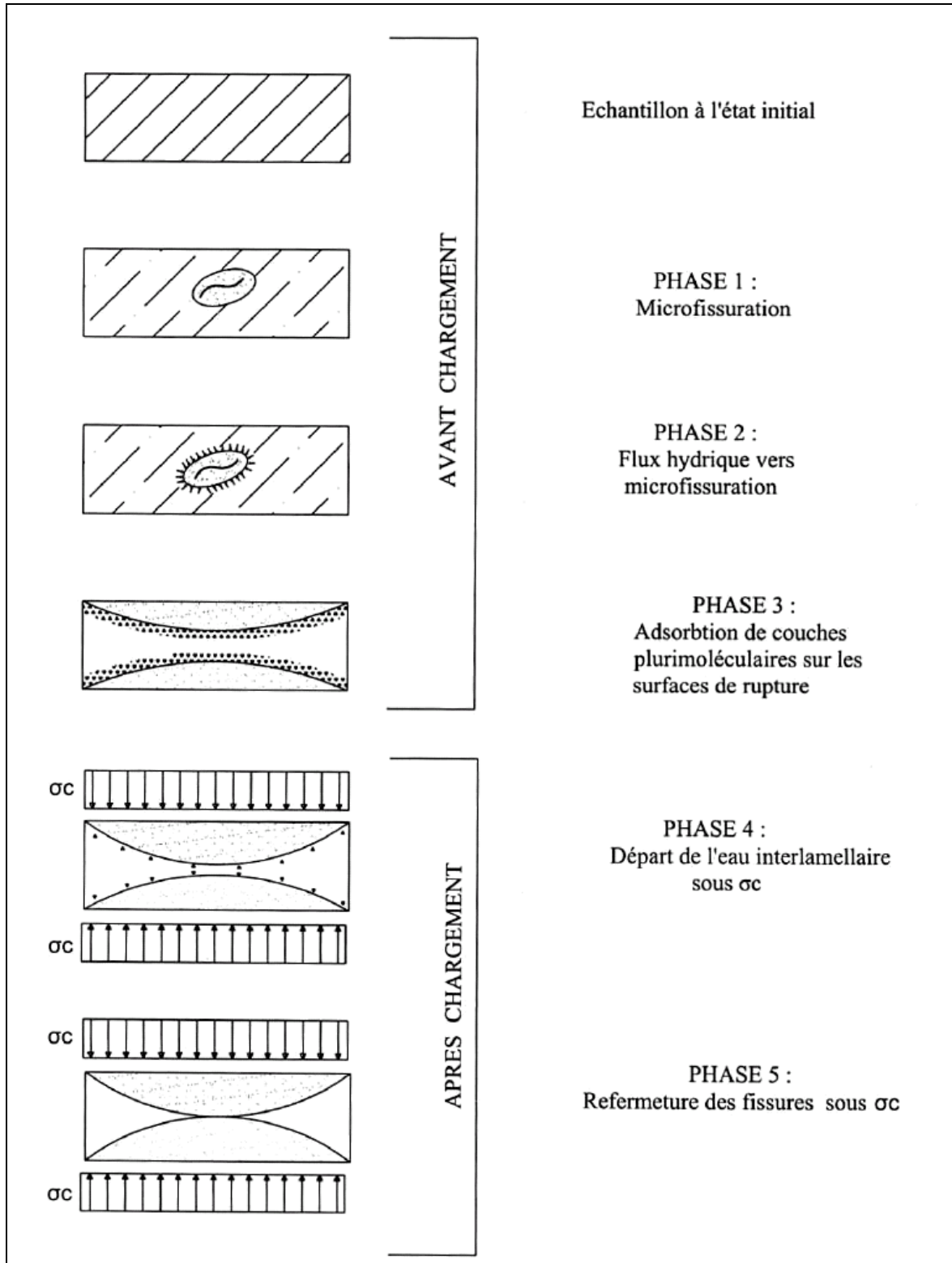


Figure 2.11 : Modèle du fluage propre du BS [34]

2.8/ EXEMPLES D'APPLICATIONS DES BETONS DE SABLE [35]

Les BS sont employés à grand échelle dans plusieurs domaines telle que le domaine de préfabrication : bordures et toitures, tuyaux, mobilier urbain, voûtes en voiles minces, caissons de plafond, cloisons et autres éléments constructifs d'immeubles, etc. Et aussi dans le bâtiment, ou le BS consiste à remplacer le BO dans des structures en béton armé coulé et vibré, ou hypercompacté : (éléments horizontaux et verticaux, dalles, fondations ...etc).

On trouve également des réalisations en béton de sable dans le domaine des chaussées routières et aéroportuaires ainsi que dans des travaux de calage de bourrage ou d'injection, sans oublier le plus important dans notre recherche, son utilisation dans le domaine des réparations. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent d'avantages à ses propriétés spécifiques par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci.

Pour mettre en évidence l'utilisation des BS dans la rénovation et réparation des ouvrages, on peut citer quelques exemples d'applications ou on mentionnera quelques formulations avec caractéristiques mécaniques des bétons de sable de réparation de quelques ouvrages (Tableau 2. 5):

- ❖ *Réhabilitation des silos à grains à Moscou* : travaux de rénovation avec ferrailage de surface et une couche de béton de sable en 6 cm d'épaisseur [23]
- ❖ *Réhabilitation d'un réfrigérant centrale thermique de **Lynbertsy** (banlieue de Moscou) 1975.* [23]
- ❖ ***Pont de Castagnède sur le salat (construit entre 1862 et 1867) et Pont de Saint Martory (construit entre 1724 et 1727), en France*** [35] : Réparation des deux grands ouvrages d'art en 1991, le problème qui s'est posé c'est l'érosion des fondations qui ne reposent plus sur le substratum, alors la réparation se fait en réalisant des corsets et des remplissages parfaits des vides qui compte de béton de sable.
- ❖ *Réhabilitation structurante d'un collecteur encombré **Agrippa d'Aubigné** de la ville Paris.* [24]
- ❖ *Réhabilitation structurante d'un collecteur fortement dégradé **Naujæ** de la ville Bordeaux.* [24]
- ❖ *Réfection de l'habillage d'un talus abrupt en bordure d'une autoroute urbaine (**A10, Lormont (France).**)* [24]
- ❖ *Réhabilitation d'une buse métallique : RN 89, **ARTIGUES** près de bordeaux.*[24]

Tableau 2. 5: Formulation et caractéristiques mécaniques des bétons de sable de réparation de quelques ouvrages

Ouvrages réparés	Formulation du béton de sable de réparation							Caractéristiques mécaniques			
	Ciment (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Filler calcaire (Kg/m ³)	Fumée de silice (Kg/m ³)	Cendre volante (Kg/m ³)	Fibres (Kg/m ³)	Superplastifiant (L/m ³)	Rc ₂₈ (MPa)	Rt ₂₈ (MPa)	Rf ₂₈ (MPa)	E (MPa)
Collecteur Agrippa d'Aubigne	(CLK45)	(0/5)	/	30	153	/	3	51.7*	/	8.2*	/
	400	1530						52.3**	/	8.5**	/
Collecteur Naujae ¹ Bordeaux	(CPJ55)	(0/2.5)	130	30	/	(Fonte amorphe) 20	3	39.90	3.90	5.80	17250
400	1400										
Collecteur Naujae ² Bordeaux	(CPJ55)	(0/2.5)	130	30	/	/	3	41.30	3.80	5.50	17070
400	1400										
Buse métallique RN89 Artigues	(CPJ55)	(0/3)	130	30	/	(Polypropylène) 1	Fluidifiant	/	/	/	/
400	1400										

*: Résultat avec un dosage en eau = 200 l/m³** : Résultat avec un dosage en eau = 210 l/m³

2.9/ CONCLUSION

Nous avons donné un concept général sur les bétons de sable. Et d'après la description des constituants du béton de sable, on a pu les définir, ensuite décrire leurs propriétés spécifiques (maniabilité et granularité fine), et on a expliqué ce qui différencie le BS d'un mortier.

Formuler un BS à partir d'un mélange ciment –sable présentera une porosité plus élevée que celle d'un BO. C'est pourquoi un constituant de granulométrie voisine de celle du ciment est toujours utilisé dans la formulation des bétons de sable cet ajout filler généralement, permet d'augmenter leur compacité. Donc la formulation des BS relève de l'optimisation de la compacité d'un mélange quaternaire : sable- ciment- filler -microfiller.

D'après notre recherche bibliographique, on a constaté que les BS présentent un retrait qui ne diffère pas fondamentalement de celui d'un BO et que le retrait mesuré traduit fidèlement ce qui se passe dans ce matériau [32]. On a vu que la cinétique du fluage de dessiccation des BS est extrêmement rapide, d'où on marque un fluage 2 fois plus important que ce du BO.

En effet le béton de sable est un matériau non fissurant, cette hypothèse est expliquée par l'absence des gros granulats et du faible module d'élasticité, de plus son uniformité du séchage, et aussi par la porométrie et l'homogénéité de ce matériau BS. Tous ces facteurs déterminant cette absence de fissures sont confirmés par A. Benaïssa qui les a justifiés par ses observations au MEB.

On a cité quelques applications de réhabilitation et réparation des différents ouvrages, ou on a constaté que le béton de sable est un bon matériau de réparation, et d'après notre recherche bibliographique on peut dire que le caractère non fissurant, ouvre au béton de sable de grands espoirs d'utilisation dans divers domaines notamment la réhabilitation ou la réparation des ouvrages dégradés.