

VERS UNE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EN MINIMISANT L'UTILISATION DU SABLE DE MER DANS LA CONSTRUCTION

*N. BOUHAMOU : Chargé de cours, Université de Mostaganem (Ingénieur d'état de l'ENTP) ;
N. BELARIBI BELAS : Maître de conférences, Université de Mostaganem ;
A. YAHIA : Maître de Conférences, Université de Sherbrooke, Canada (Ingénieur d'état de l'ENTP) ;
A. MEBROUKI : Chargé de cours, Université de Mostaganem (Ingénieur d'état de l'ENTP)*

RÉSUMÉ

Le travail présenté dans cet article fait partie d'une étude lancée dans le cadre d'un projet de recherche agréé par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Cette idée est venue suite à l'utilisation massive des sables de mer et la méconnaissance et le non-respect des normes en vigueur sur les sables. Cette étude, dont la première partie a pour but principal d'étudier l'influence de la qualité des sables sur les performances mécaniques instantanées et différées des mortiers sera prochainement étendue sur les bétons vibrés et les bétons autoplaçants. Elle va être consacrée à une enquête suivie d'une étude technico-économique élargie sur la nature et la qualité des sables utilisés dans les chantiers de la région de Mostaganem et comprendra les résultats comparatifs des essais mécaniques sur des mortiers à base de sables naturels de mer et de carrière (tels qu'ils sont utilisés sur chantiers) et de sables traités (combinés, lavés, tamisés et corrigés en fines selon les normes).

Mots-Clés

Sable de mer, sable de concassage, chantier, enquête, étude technico-économique, mortiers, résistances mécaniques, retrait.

1. INTRODUCTION

Le sable est l'élément qui a sur le béton ou le mortier, selon ses qualités, une influence prépondérante : il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange, il doit être dense provenant des roches chimiquement inertes tels que : les calcaires durs, les granites et les quartzites.

Le sable à béton ou mortier ne doit pas contenir d'éléments nuisibles (matières organiques, argiles, sels solubles, éléments coquilliers, etc...) en quantité tels qu'ils pourraient porter préjudice à la durabilité du béton ou provoquer une corrosion des armatures.

En général, il faut éviter les sables provenant de certaines roches tendres, friables et altérables sous l'action de l'eau et de l'air, comme les roches trop micacées et celles contenant des sulfates de calcium sous forme de gypse qui altère les ciments.

La valeur d'un sable s'estime par sa courbe granulométrique, de la forme et la propreté des grains, de sa nature chimique, de l'altérabilité, de la dureté et la fragilité des grains.

Les documents normatifs concernant les granulats [1] indiquent clairement un certain nombre de limites admissibles qui peuvent être extrêmement importants vis-à-vis de la durabilité du béton.

La composition granulométrique d'un sable est d'une grande importance pour la qualité des bétons ; les grains d'un sable doivent être de dimensions différentes pour assurer un volume minimal des vides afin de diminuer la consommation en ciment et d'obtenir des bétons compacts. Des recherches [2] sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles.

L'ancienne norme P 18-541 fixe les limites du module de finesse des sables à 1.80 et 3.20, mais l'optimum qui donnera le meilleur compromis résistance-maniabilité - maintien de l'homogénéité se situe entre 2.20 et 2.80. A cette prescription s'ajoutait, pour les bétons de $f_{c28} > 36$ MPa, l'obligation que la valeur de ce module de finesse ne s'écarte pas plus de ± 0.3 , en valeur absolue, de sa valeur moyenne, cette tolérance qui impliquait une régularité dans la fourniture du sable étant reprise par le fascicule 65 A dans le cas des bétons de $f_{c28} \geq 30$ MPa ou pour les bétons de $f_{c28} < 30$ MPa quand ceux-ci sont mis en œuvre à la pompe.

La teneur en sulfates dans un sable doit être inférieure à 0.2 % conformément à la norme NF EN 196 -2 [3]. La présence de

sulfates dans les granulats est à l'origine de réactions expansives dues à la formation d'ettringite.

La norme P 18 583 stipule que le pourcentage des chlorures doit être indiqué par le fournisseur s'il est égal ou supérieure à 0.02 %.

Le pourcentage d'éléments coquilliers dans un sable doit être inférieur ou égal à 5% conformément à la norme XP P 18 540. Si les éléments coquilliers sont en trop grandes proportions, ils peuvent diminuer sensiblement les résistances et l'ouvrabilité des bétons.

La demande incompressible en sable de construction en Algérie et la rareté de ce matériau a conduit à certains comportements ayant provoqué des atteintes graves et parfois irréversibles à l'environnement. Ainsi en est-il des extractions sauvages des sables de mer qui ont conduit à l'appauvrissement des plages.

D'autre part, les carrières exploitent d'importants gisements de roches à majorité calcaires et rejettent après concassage une quantité toute aussi importante de sable concassé. Ce dernier occupe une surface de stockage de plus en plus grande qui pose le problème de son évacuation.

Actuellement, en Algérie, les sables de concassage par leur méconnaissance, sont les moins recherchés que les sables de mer ou d'oued par l'absence de normes ou des règles qui définissent leurs caractéristiques ainsi que leur limite d'emploi.

Dans ce qui suit, nous présenterons les principaux résultats d'une enquête menée sur la nature et la qualité des sables des chantiers de Mostaganem (ouest algérien) corroborée par une étude technico-économique qui s'est avérée indispensable. Pour mettre en évidence les conséquences du non respect des normes sur chantiers, nous proposons une étude des caractéristiques mécaniques des mortiers à base de sables tels qu'ils sont utilisés sur la majorité de nos chantiers comparée à celle menée sur des mortiers répondant aux exigences normatives.

La première partie de notre étude a révélé une réalité très grave quant à l'utilisation anarchique des sables dans la construction. Le marché algérien se doit de faire un pas vers à l'avant afin d'améliorer la qualité de la construction bien avant le commencement des travaux. Il va falloir contrôler à la base et non au sommet : vérifier si les granulats et notamment les sables sont conformes aux normes et réglementations et diminuer l'exploitation massive des sables de mer qui présente un impact négatif sur l'environnement.

Pour appuyer notre recherche, une deuxième partie cette fois ci expérimentale a été entamée. Il s'agit de l'étude du comportement mécanique des mortiers. Ceux-ci sont composés de sables, couramment utilisés dans les chantiers de la région de Mostaganem, de différentes origines et provenances (trois sables de mer et un sable de carrière). Nous proposons de comparer les propriétés des mortiers contenant ces sables tels qu'ils se présentent sur chantier (sans contrôle, ni essais, ni lavage,....) avec celles des mortiers ayant des sables combinés (identifiés, combinés, tamisés, lavés et corrigés en fines selon les normes).

2. ENQUÊTE SUR LA QUALITÉ DES SABLES DANS LES CHANTIERS DE LA RÉGION DE MOSTAGANEM (OUEST ALGÉRIEN)

L'utilisation accrue des sables de mer naturels en Algérie en particulier dans la région de Mostaganem (Salamandres, Sablettes, Sidi Lakhdar) dans les chantiers de bâtiments, est un problème qui ne cesse de préoccuper les chercheurs.

Cette situation nous a poussé à mener une enquête, dans différents chantiers de bâtiment de la wilaya de Mostaganem en se basant sur la nature du sable utilisé, la provenance du sable, provenance permanente ou variable, le traitement du sable, essais sur sable.

Durant toute cette enquête qui a été menée sur douze grands chantiers de construction, nous avons remarqué que tous les sables utilisés que ce soit de mer ou de concassage ne sont guère lavés ni tamisés ni corrigés en fines et aucun essai selon les normes en vigueur n'a été effectué tels que l'équivalent de sable, teneur en chlorure, bleu de Méthylène, teneur en sulfate, teneur en éléments coquilliers et granularité.

Les sables qui normalement doivent avoir sur le béton selon leurs qualités, une influence prépondérante, ne répondent pratiquement à aucun critère. Leur mise en œuvre dans les bétons exige simplement aux entreprises de fournir des résultats d'écrasement d'éprouvettes.

C'est pourquoi nous sensibilisons les entreprises de construction à s'intéresser de près aux qualités que doit normalement posséder un sable de construction qu'il soit sable de concassage ou sable de mer (même si nous déplorons son utilisation intensive). Ces qualités se résument comme suit :

1. Le sable à béton ou à mortier ne doit pas contenir d'éléments nuisibles en quantité tels qu'ils pourraient porter préjudice à la durabilité du béton ou provoquer une corrosion des armatures.
2. La valeur d'un sable s'estime par sa courbe granulométrique, de la forme et la propreté des grains, de sa nature chimique, de l'altérabilité, de la dureté et la fragilité des grains.
3. La courbe granulométrique du sable doit appartenir au fuseau proposé pour la granularité optimale de sable à béton. Ce qui correspond à un module de finesse (MF) compris 2.2 et 2.8 [2].
4. La nécessité de maîtriser les fines dans les sables : l'expérience [4] montre que de tels traitements faits en carrière permettent de garantir dans les sables des fines ayant des valeurs de bleu très largement inférieures à 1 et des produits ayant des équivalents de sable de 75 pour des proportions de fines dépassant 10 %.
5. Le lavage des sables consiste à l'élimination des particules argileuses et les fines selon les tolérances exigées.

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1. ANALYSE DES MATÉRIAUX UTILISÉS

3.1.1. LE CIMENT

Lors du broyage du clinker, des composants secondaires (gypse, laitier de haut fourneau, fillers, cendres volantes, pouzzolanes) peuvent être ajoutés pour influencer certaines propriétés, causant ainsi des obstacles de comparaison des compositions. C'est la raison pour laquelle le ciment utilisé pour la confection du mortier appartient à la classe CPA 42.5 ne contenant aucun ajout secondaire.

La composition minéralogique du clinker établie selon les formules de Bogue pour les calculs des quatre phases du clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) est donnée par le tableau 1.

Constituant	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Pourcentage	38.45	34.49	10.69	11.35

Tableau 1 : Composition minéralogique du clinker selon Bogue

Les résistances à la compression et à la traction du mortier de ciment sont obtenues en constituant un mortier normal conformément à la norme NF EN 196-1 (Août 1995, méthodes d'essais des ciments Partie 1 : détermination des résistances mécaniques indice de classement P 15-471.)

Les essais effectués à l'âge de 2, 7 et 28 jours à raison de 3 éprouvettes par échéance sont représentés dans le tableau 2.

AGE	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
2 jours	05.97	17.20
7 jours	07.61	38.52
28 jours	11.61	44.38

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques du mortier normal du ciment Portland.

On peut aisément classer ce ciment dans la classe des CPA 42.5 puisque sa résistance à la compression à 28 jours (R_{c28}) vérifie Ref. [3]:

$$(L_s = 62.5 \text{ MPa}) > R_{c28} > (L_i = 42.5 \text{ MPa})$$

Où L_i est la limite inférieure et L_s est la limite supérieure.

3.1.2. LES SABLES

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé sept sables de fraction 0/3 ; trois sables mer, un sable de concassage et trois sables traités. Les sables de mer proviennent de la région de Mostaganem

(SALAMANDRE, les SABLETTES et SIDI LAKHDAR). Le sable concassé est celui de la carrière de la région Ouest :

Oran (KRISTEL). Les sables traités comportent respectivement 40% de sable de Salamandre et 60% de sable de Kristel, 40% de sable des Sablettes et 60% de sable de Kristel, 40% de sable de Sidi Lakhdar et 60% de sable de Kristel Ref. [4].

Nous symboliserons, Dans ce qui suit, les différents sables par :

- **Sables naturels** : sables tels qu'ils sont présents sur chantier.
- **Sables Traités** : (sables de mer + sables de carrière) tamisés, lavés, combinés, et corrigés en fines.
- **Sm_1 , Sm_2 , et Sm_3** , respectivement le sable naturel de mer de Salamandre, des Sablettes et de Sidi Lakhdar.
- **Sc** : le sable de carrière de Kristel.
- **Sm_1Sc** : sable traité (60% sable de Kristel + 40% sable de Salamandre).

- Sm_2Sc : sable traité (60% sable de Kristel + 40% sable de Sablettes).
- Sm_3Sc : sable traité (60% sable de Kristel + 40% sable de Sidi Lakhdar).

Les principales caractéristiques physiques des sables naturels (tels qu'ils sont présents sur chantier) et des sables traités sont représentées dans le tableau 3.

Désignation	Masse volumique (g/cm ³)		Cu	Cc	Equivalent de sable (%)		Module de finesse	Pourcentage de fines (%)	Eléments coquilliers (%)	Impuretés prohibées (%)
	absolue	apparente			Visuel	Piston				
Sm ₁	2.67	1.43	1.83	1.05	75	71.46	1.51	4.12	12.76	0.30
Sm ₂	2.69	1.54	1.17	1.06	96	91	0.97	4.38	4.35	0.13
Sm ₃	2.66	1.25	1.76	0.95	86.54	81.47	1.36	2.80	6.39	0.22
Sc	2.77	1.60	17.75	0.74	68.90	64.30	2.61	20.82	Nul	Nul
Sm ₁ Sc	2.67	1.39	9.41	0.92	81.74	78.13	2.30	10	Nul	Nul
Sm ₂ Sc	2.68	1.41	9.54	1.01	82	78.64	2.36	10	Nul	Nul
Sm ₃ Sc	2.65	1.37	9.32	0.91	81.58	77.85	2.28	10	Nul	Nul

Tableau 3 : Caractéristiques physiques des sables

Les courbes granulométriques sont données par les figures 1 et 2.

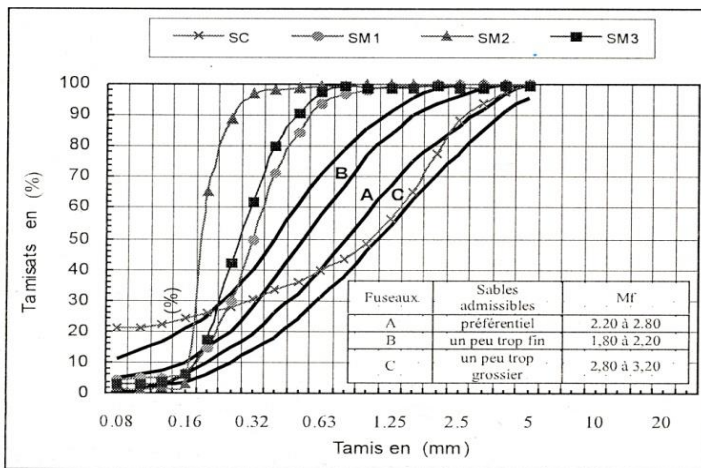


Figure 1 : Courbes granulométriques des sables naturels

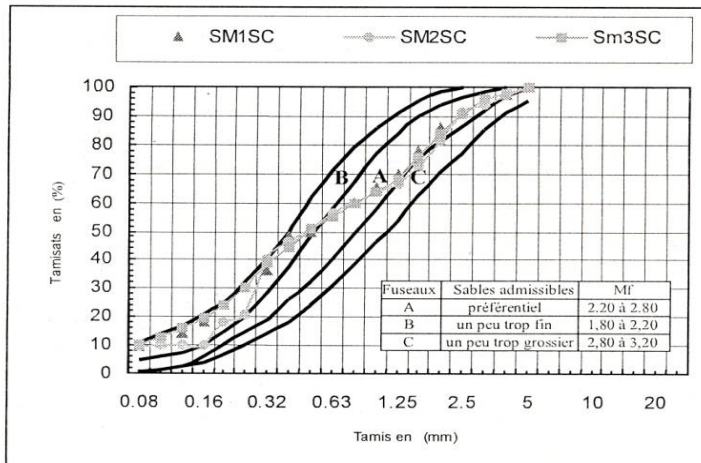


Figure 2 : Courbes granulométriques des sables traités.

Les résultats de l'étude des sables naturels et des sables traités permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les valeurs de l'équivalent de sable selon la norme NF P 18 598 données par le tableau 6 prouvent que les sables naturels de Sablettes et Sidi Lakhdar sont des sables très propres, signe d'un manque presque total de fines argileuses, on peut craindre un défaut de plasticité du béton. Par contre les sables de Salamandre et Kristel sont très légèrement argileux pouvant présenter un retrait légèrement plus fort.

- Les valeurs de l'équivalent de sable des trois que c'est des sables qui conviennent parfaits bétons de haute qualité.
- Les valeurs des coefficients d'uniformité et de Cc données dans le tableau 3 permettent de sables de mer ont une granulométrie serrée, p de carrière ainsi que les sables traités ont granulométrie uniforme.
- Les courbes granulométriques des trois sables (Salamandre, Sablettes, Sidi Lakhdar) ne sont courantes en effet elles ne s'insèrent pas dans les courbes, leurs formes permettent de dire déjà que les sables à majorité de grains fins. Par contre le sable de Kristel s'insère dans sa grande part pourcentage de fines calcaires reste à corriger.
- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être déterminé par le calcul du module de finesse MF. Plus le module de finesse est faible plus le sable est riche en éléments fins. Les modules de finesse des sables de mer naturels sont inférieurs à 1.80 ce qui confirme qu'ils sont riches en éléments fins. Le sable de carrière présente un module de finesse (Mf = 2.61) supérieur à 2.20 ce qui signifie qu'il est plus grossier.
- Les valeurs du pourcentage d'éléments coquilliers dans les tableaux ci-dessus montrent que seuls les sables de mer naturels de Sidi Lakhdar qui comportent de grandes coquilles respectivement 12.76 % et 4.35 % sont supérieures à 5%. La présence de tels pourcentages de coquilliers dans un sable peut nuire à la maniabilité et à l'accroissement du dosage en eau.
- La nouvelle norme NF P18 540 préconise un pourcentage de fines (éléments inférieurs à 0,08 mm) compris entre 8% et 12%. Les pourcentages de fines des différents sables sont tous inférieurs à 8%. Cette qualité de fines ne permet pas d'obtenir un béton suffisamment résistant et réduit les résistances mécaniques.
- Le sable de carrière comporte un excès de fines qui est défavorable, car il accroît la demande en ciment, ce qui conduit à un rapport E/C. plus faible.
- Les impuretés prohibées (norme NF P18 540) telles que les débris végétaux (brindilles, racines, algues, charbon ou de résidus divers (plastique, métal, etc.), sont déterminées par triage manuel. La teneur en impuretés prohibées doit être inférieure à 0,30% pour les sables de mer naturels et à 0,22% pour les sables traités.

4. RÉSULTATS ET ANALYSE

Après avoir défini les principales caractéristiques des matériaux, l'étude de l'évolution des propriétés des mortiers en fonction de la qualité et la nature du sable a été effectuée. Les mortiers ont été testés :

- Un mortier à base de sable de mer naturel (MSm₁);
- Un mortier à base de sable de mer naturel (MSm₂);
- Un mortier à base de sable de mer naturel (MSm₃);

- Un mortier à base de sable de carrière naturel de Kristel (MS_c) ;
- Un mortier à base de sable traité (mélange entre sable de Salamandre et sable de Kristel) (MSm₁S_c) ;
- Un mortier à base de sable traité (mélange entre sable de Sablettes et sable de Kristel) (MSm₂S_c) ;
- Un mortier à base de sable traité (mélange entre sable de Sidi Lakhdar et sable de Kristel) (MSm₃S_c).

La quantité d'eau de gâchage conditionne, en grande partie, l'ouvrabilité d'un mortier. Le degré d'ouvrabilité s'il existait toutefois un moyen de le spécifier et de le mesurer serait fonction de la maniabilité.

Pour les différents sables, des quantités d'eau successives seront ajoutées aux mélanges jusqu'à obtention d'une maniabilité constante. Pour ce faire, nous avons utilisé la table à secousses (Schéma.1) : le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenu l'étalement en % est donné par la formule :

$$E \% = 100 \times (D_f - D_i) / D_i$$

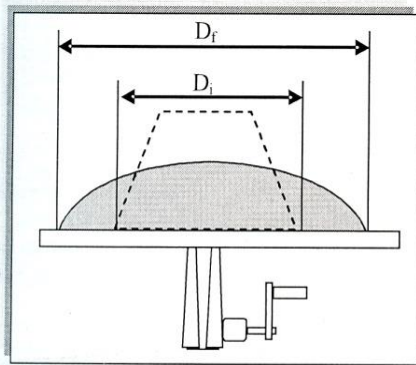


Schéma.1 : Table à secousses [2].

Pour illustrer les résultats obtenus, nous avons tracé les variations de l'étalement E en fonction du rapport E/C (Figure 3).

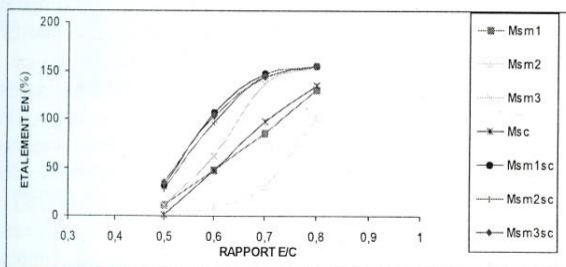


Figure 3 : Variation de l'étalement E en fonction du rapport E/C.

Cette figure montre que pour garder une maniabilité constante, celle correspondante à un étalement variant de 45% ÷ 50%, il a fallu augmenter la quantité d'eau de gâchage en fonction de la nature et la qualité de chaque sable. En effet la quantité d'eau demandée par les sables naturels est plus importante que les sables corrigés.

Les éprouvettes ainsi confectionnées sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance de l'essai. La quantité de mortier nécessaire pour un moule (3 éprouvettes) est indiquée par les compositions présentées dans le tableau 4.

Mortiers	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	E/C
Msm ₁	450	1350	270.90	0.602
Msm ₂	450	1350	325.80	0.724
Msm ₃	450	1350	256.50	0.570
Ms _c	450	1350	270.45	0.601
Msm ₁ S _c	450	1350	234.45	0.521
Msm ₂ S _c	450	1350	237.60	0.528
Msm ₃ S _c	450	1350	233.10	0.518

Tableau 4 : Compositions des mortiers pour une maniabilité constante.

Nous avons choisi les mesures de variations dimensionnelles des différents mortiers, sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm² des moules munis de plots de retrait pour les raisons ci-après :

- Les variations dimensionnelles sont mesurées dans le sens longitudinal, sur l'axe de l'éprouvette, la méthode unidimensionnelle (mesure de la distance entre deux plots ancrés dans l'éprouvette). Ces éprouvettes ont dans ce cas une ou deux dimensions nettement plus petites que la troisième, où les effets du retrait sont les plus sensibles, c'est le cas représentatif des éléments structuraux [5].
- Avec ces éprouvettes les dimensions sont assez grandes par rapport à celles des plus gros grains des matériaux constitutifs, alors que les gradients et les erreurs sur la masse volumique et la teneur en eau restent assez faibles [5].

Pour les essais de perte de masse et des déformations libres (retrait total) le rapport E/C est gardé constant (E/C = 0.5). Les éprouvettes sont conservées dans une ambiance desséchante.

4.1. COMPORTEMENT DU MORTIER À L'ÉTAT FRAIS

A maniabilité constante, nous avons déterminé le temps de début et fin de prise des différents mortiers étudiés. Les résultats d'essais sont consignés dans le tableau 5.

Mortiers	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
Msm ₁	5 h 30	8 h 50
Msm ₂	5 h 00	8 h 20
Msm ₃	4 h 50	8 h 00
Ms _c	5 h 20	8 h 30
Msm ₁ S _c	4 h 00	7 h 00
Msm ₂ S _c	4 h 10	7 h 20
Msm ₃ S _c	3 h 50	7 h 00

Tableau 5 : Début et fin de prise des différents mortiers élaborés

Les résultats obtenus montrent que les mortiers à base de sables naturels présentent des temps de prise plus longs que ceux des sables corrigés. Ceci est dû essentiellement à la teneur en eau élevée de ces derniers. Il apparaît clair que les sables naturels influent énormément sur la prise des mortiers à cause de leur non-lavage ainsi que la présence d'impuretés en particulier dans le sable de Salamandre.

4.2. COMPORTEMENT DU MORTIER À L'ÉTAT DURCI

4.2.1. RÉSISTANCES MÉCANIQUES

La résistance mécanique du mortier après durcissement dépend du rapport E/C, de la qualité et nature du sable, du mode de conservation du mortier et de l'échéance d'essai. Cette résistance mécanique est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression et traction.

Nous présentons les résultats des essais de la résistance à la compression et à la traction effectués sur les éprouvettes de dimensions 4x4x16 constituées par les sept mortiers. L'approche graphique a été choisie pour faciliter davantage l'analyse des résultats trouvés et aussi pour mieux suivre l'évolution des résistances au cours du temps. Les écarts-types obtenus sur les trois mesures sont respectivement inférieur à 0,6 pour la compression et 0,5 pour la traction par flexion

Les résultats sont donnés par les figures 4 et 5.

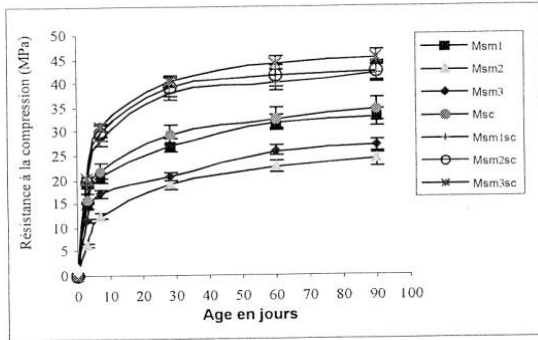


Figure 4: Variation des résistances à la compression des mortiers en fonction du temps

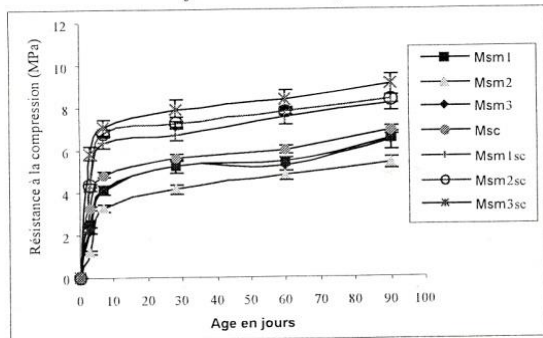


Figure 5: Variation des résistances à la traction des mortiers en fonction du temps

On constate d'après ces résultats que la vitesse d'évolution des résistances en compression des mortiers à base de sables traités se développe rapidement par contre celle des mortiers à base de sables naturels est largement diminuée.

L'utilisation des sables naturels conduit à une importante baisse des résistances causée par le fait que les mortiers contenant ces sables, soient plus poreux donc plus fragiles.

Il y a plusieurs explication à cela : les teneurs en eau au malaxage ne sont pas les mêmes pour une meilleure consistance, la demande croissante en eau diminue la résistance car elle favorise l'augmentation de la porosité. Le défaut en pourcentage de fines des trois sables de mer naturels ainsi que l'excès de fines que présente le sable naturel de carrière, influe énormément sur la compacité du mortier et par conséquent sur la baisse des résistances.

En revanche, les gains de résistances obtenus pour les mortiers à base de sables corrigés semblent être directement liés aux propriétés particulières des sables et en particulier les sables concassés et les fractions les plus fines (< 80 µm). Celles-ci adhèrent avec la pâte hydratée de ciment. Il faut ajouter que les fines, quand elles sont présentes en quantité modérée (10% pour le cas de nos sables corrigés) améliorent la compacité des mortiers et par la suite leur résistance. Nous notons de fortes résistances à la compression pour le mortier Msm₃sc à base de sable de mer de Sidi Lakhdar et de sable de carrière de Kristel par rapport à celles du mortier Msm₂ à base de sable de mer naturel des Sablettes dues à la

forte adhérence pâte-grain de sable.

L'évolution de la résistance à la traction est influencée par les mêmes facteurs que ceux qui influencent l'évolution de la résistance à la compression, les deux résistances évoluent dans le même sens.

On peut raisonnablement s'attendre à ce que la qualité et la nature d'un sable influent sur l'aspect général de la microstructure. Ce que nous avons effectivement constaté : nous nous proposons d'expliquer les principaux résultats concernant l'influence des deux sables sur les caractéristiques suivantes :

- La structure de la pâte au contact des granulats,
- La vitesse de prise,
- La nature et la cinétique des réactions d'hydratation.

Les C-S-H qui normalement doivent être en quantité suffisante pour jouer convenablement le rôle de remplissage des vides intergranulaires [2], [6], marquent une très faible présence dans le mortier à base de sable de mer naturel Msm₂ (figure 6.a) ce qui a provoqué un mauvais enveloppement des grains de sable dans la pâte. Nous pensons que cela est dû essentiellement au défaut de fines et de la granulométrie non courante du sable Sm₂.

Les images obtenues en microscope électronique à balayage du mortier à base de sable corrigé Msm₃Sc montrent une formation de la portlandite en quantité suffisante autour d'un grain de sable (figure 6.b). les granulats (grain roulé, grain concassé) présentent un aspect extrêmement compact. La liaison entre grains de sable et la pâte de ciment paraît excellente.

Les vues sur M.E.B montrent bien la différence de la microstructure d'un mortier à base de sable de mer naturel et celui avec sable corrigé. En plus, les images obtenues confirment bien les comportements opposés des deux mortiers en particulier l'écart important entre leur résistances à la compression.

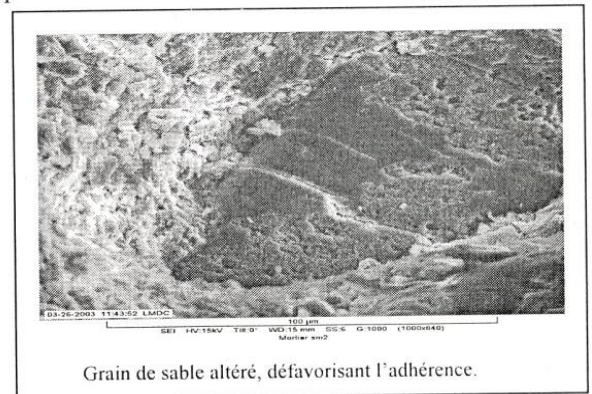


Figure 6.a : Vues au microscope électronique à balayage du mortier à base de sable naturel (Msm₂)

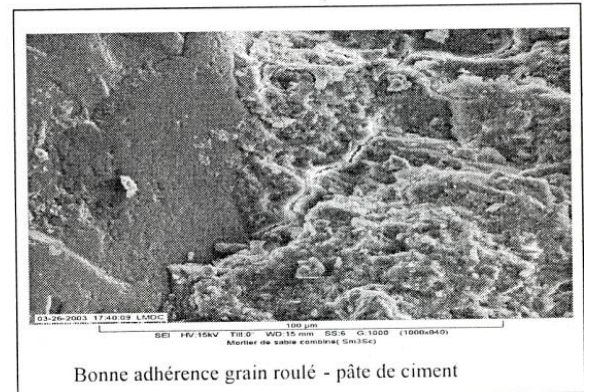


Figure 6.b : Vues au microscope électronique à balayage du mortier à base de sable corrigé (Msm₃Sc)

4.2.2. RETRAIT TOTAL ET PERTE DE MASSE

L'hydratation et les échanges d'eau avec l'atmosphère provoquent sur les bétons et les mortiers, indépendamment de toute sollicitation mécanique externe, des déformations de retrait. Nous présenterons les tendances générales des évolutions des déformations naturelles (retrait total et pertes de masse) observées sur nos mortiers (Fig. 7 et 8).

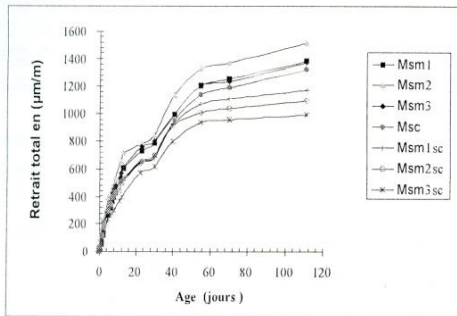


Figure 7: Evolution des déformations de retrait total des mortiers en fonction du temps

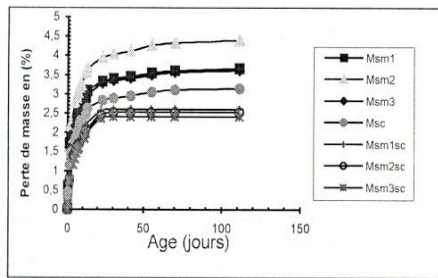


Figure 8: Evolution des pertes de masses des mortiers en fonction du temps

Pour chaque composition des mortiers à base de sables traités, deux phases distinctes apparaissent dans le développement des déformations : la vitesse d'évolution est élevée pendant le premier mois, pour l'ensemble des mortiers, puis ralentit fortement pour devenir parfois constante au delà du deuxième mois.

Les sables contenant les sables naturels présentent une progression continue des déformations qui se poursuit au-delà de 90 jours.

La consommation de l'eau par l'hydratation, principal facteur de retrait, dépend de la taille des pores et du degré d'interconnexion du réseau poreux [7]. Ainsi nous pensons que dans les mortiers avec sables naturels, les pores soient plus nombreux. Dans ce cas, l'eau libre qui s'y trouve n'est soumise à aucune tension capillaire.

Le retrait dépend aussi de la teneur en fines. En effet quand leur taux est faible (<6%) c'est le cas des sables de mer naturels ou fort comme le cas du sable de carrière naturel, elles jouent favorablement sur le retrait [4]. Par contre les mortiers à base de sables corrigés où le pourcentage de fines est modéré (égal à 10%), le retrait diminue donc les fissures sont moins présentes.

Plus le diamètre maximal de granulats est élevé et moins il y a de retrait. On remarque qu'un mortier à base de sable fin comme les sables naturels des Sablettes et de Sidi Lakhdar se caractérise par des mouvements d'humidité plus importants que ceux d'un mortier confectionné avec des sables corrigés (à granulométrie uniforme).

Les déformations de retrait sont causées essentiellement par les variations hydriques induisant le développement des autocontraintes. En effet, lors des échanges d'eau les variations de masse dépendent en partie de l'état du réseau poreux de la pâte [7].

Les pesées sont effectuées simultanément sur les éprouvettes de retrait. Les pertes de poids constatées pendant le durcissement

correspondent à l'évaporation de l'eau libre par suite de la différence d'hygrométrie avec l'ambiance extérieure.

La figure 8 présente l'évolution moyenne des quantités d'eau évaporées en fonction du temps pour les différentes éprouvettes conservées en échange avec le milieu extérieur.

La figure 8 présente l'évolution moyenne des quantités d'eau évaporées en fonction du temps pour les différentes éprouvettes conservées en échange avec le milieu extérieur.

Nous distinguons deux étapes différentes pendant l'évolution des variations de masse : pour les mortiers à base de sables naturels, la cinétique est accélérée jusqu'à plus de deux mois, au-delà de cet âge elle est stabilisée. Par contre la cinétique des mortiers à base de sables corrigés est accélérée jusqu'à un mois puis devient constante. Durant la première étape, la consommation de l'eau due à l'hydratation des silicates de calcium est intense et conduit à un assèchement interne donc moins d'eau évaporable pendant la deuxième étape.

Les mortiers à base de sables corrigés présentent des pertes de masses plus faibles que celles des mortiers à base de sables naturels.

5. ETUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Dans ce qui a été présenté précédemment, nous avons montré, qu'un sable lavé, tamisé, corrigé en fines et comportant une combinaison de 60% de sable de carrière et 40% de sable de mer, joue un rôle primordial dans l'amélioration des performances du mortier.

Ces résultats expérimentaux, bien qu'encourageants, ne sauraient justifier, à eux seuls, l'utilisation d'une solution plutôt qu'une autre. Il faudra prendre en considération plusieurs autres facteurs : économiques, écologiques, etc.

Depuis le début de l'année 2003, la carrière était restée fermée ce qui occasionna une raréfaction provoquant une vertigineuse augmentation du prix du sable de mer dans la région. C'est ainsi que le camion de 3 m³, qui était cédé à 1400 DA, était négocié ces derniers jours jusqu'à 2500 DA. Les constructeurs furent contraints de se battre sur un sable de qualité médiocre. Les plus exigeants se trouvèrent dans l'obligation d'arrêter leur chantier. Certains commerçants peu scrupuleux proposèrent, à des prix insensés, du sable qu'ils dérobaient sur les dunes des plages environnantes.

Afin de permettre une utilisation rationnelle, le nouveau maire a proposé la création d'une entreprise dont la commune de Sidi Lakhdar sera l'unique actionnaire. Après les formalités d'usage, l'entreprise est enfin prête à activer non seulement dans la région, mais à l'échelle nationale.

5.1. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION DU SABLE DE MER DE SIDI LAKHDAR

Le manque de législation rigoureuse en matière d'exploitation de sable de mer fait qu'il n'y a pas d'organisme public unique administrant ce service, si bien que l'on dispose pas actuellement de statistiques complètes de projeter des prévisions. La carrière de Sidi Lakhdar disposera, désormais, d'une assiette de 24 hectares extensible à 30 hectares [8]. Sa capacité de production est estimée à 500 m³/j [8].

5.2. ESTIMATION DE LA PRODUCTION DE SABLE DE CONCASSAGE DE KRISTEL

La carrière de Kristel située à quelques kilomètres de la wilaya de Mostaganem, constitue une importante réserve estimée selon l'entreprise de l'ouest ENOF à 9 millions 500.000 m³[9]. Sa capacité de production est de l'ordre de 240 m³/j,

un chiffre qui correspond à moins de 50 % de la capacité du sable de mer de Sidi Lakhdar.

5.3. PROBLÈME ÉCONOMIQUE ET ÉCOLOGIQUE

Les prix des sables aussi bien de mer que de concassage, ne sont pas stables et obéissent à la loi de l'offre et la demande. Cependant, des renseignements fournis auprès de l'APC de Sidi Lakhdar [8] et de l'ENOF de Kristel [9] ont abouti aux résultats donnés par le Tableau 6.

Type de sable	Prix de vente hors taxe en DA/Tonne
Sable de mer de Sidi Lakhdar	300
Sable de concassage de Kristel	170

Tableau 6 : Prix des deux types de sables.

En nous basant sur ces deux prix, nous allons tenter de calculer le prix du mélange $S_{m_3}S_c$ (combinaison entre le sable de mer de Sidi Lakhdar : S_{m_3} et du sable de carrière de Kristel : S_c) que nous avons utilisé dans notre étude. Nous signalons que le calcul est basé sur les pourcentages en masses des constituants du mélange. Les résultats sont les suivants (Tableau 7) :

Mélange	% en masse (S_{m_3})	% en masse (S_c)	Prix en DA / Tonne
$S_{m_3}S_c$	40	60	222

Tableau 7 : Prix du mélange des deux sables.

Nous remarquons, donc, que le sable de concassage mélangé avec du sable de mer permet, tout en protégeant l'environnement du littoral et en améliorant les performances du mortier, l'abaissement du prix de revient du même mortier.

L'exploitation sauvage des plages dans la région de Mostaganem qui conduit inévitablement à une situation de chaos, la non régénération des plages exploitées constituent un problème écologique difficilement surmontable. Et si nous avons montré l'intérêt de l'utilisation du sable de concassage, la plupart des stations de concassage en Algérie ne sont pas équipées d'installation de lavage et de défilérisation permettant de maîtriser la teneur en fines.

5.4. COMPARAISON SOMMAIRE DES DEUX SABLES

Nous résumons dans le tableau ci-dessous les principaux paramètres conditionnant le choix d'un sable :

Paramètres	Sable de mer (S_{m_3})	Sable de concassage (S_c)
Granulométrie	très hétérogène, manque souvent de la fraction 2 - 5 mm	plus ou moins incorrecte
Propreté	défaut en proportion de fines	excès de fines
Quantité disponible	limitée	plus de 9 millions 500 000 m ³ pour Kristel seul
Risques écologiques	non régénération sûre des plages	aucun
Prix à la vente HT	300 DA/T	170 DA/T
Points de livraison	Dispersés le long des côtes	Dispersés dans les régions proches de Mostaganem

Tableau 8 : Comparaison des différents paramètres des deux sables.

6. CONCLUSION

L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de minimiser l'utilisation intense du sable de mer et la valorisation du sable de concassage. Ces deux derniers n'ayant pas le même prix de revient. En effet le sable corrigé (lavé, tamisé, corrigé en fines et comportant 60 % en sable de concassage et 40 % en sable de mer) est beaucoup moins cher que le sable de mer. Mais les mortiers obtenus avec du sable corrigé ne peuvent être retenus que s'ils présentent des performances physico-chimiques et mécaniques nettement meilleures que celles obtenues avec le sable naturel (tel quel est utilisé sur chantier).

Pour mener à bien ce travail nous avons d'abord étudié les caractéristiques physico-chimiques de tous les matériaux rentrant dans la composition des mortiers utilisés et réalisé tous les essais couramment employés pour une meilleure identification de ces matériaux. Ensuite nous avons entrepris tous les essais concernant les mortiers frais (maniabilité, prise) et les mortiers durcis (essais des résistances mécaniques, déformations libres et vues au M.E.B).

De cette étude nous pouvons dégager un certain nombre de conclusions

- La présence de fines en proportion modérée dans les sables est une nécessité. Nous voyons, en effet que les mortiers à base de sables corrigés renfermant 10 % de fines, offrent des performances meilleures, que celles des mortiers à base de sables naturels (de mer ou de carrière).

- D'après nos résultats mécaniques, nous avons pu remarquer que l'ES couplé au module de finesse peut constituer, à lui seul, un bon critère d'acceptation d'un sable.

- L'utilisation de mélanges de sables réduit le coût du mortier tout en améliorant ses caractéristiques physiques et mécaniques.

Le long de cette étude, notre objectif principal est de minimiser l'utilisation des sables de mer et revaloriser les sables de concassage ce qui est possible et même indispensable d'après nos résultats.

En résumé, le sable de carrière qui présente l'avantage d'exister, en grande abondance, dans les régions très proches de Mostaganem, constitue une solution élégante au problème d'approvisionnement mais à condition qu'il soit corrigé avec du sable de mer en faibles proportions.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Baron et J.P. Olivier : « Les bétons bases et données pour leur formulations ». Edit. Eyrolles. 1999.
- [2] G. Dreux et J. Festa : « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». Edit. Eyrolles. 1998.
- [3] Z. Guemmadi, B. Toumi, H. Houari, P. Clastre : « Amélioration des performances des bétons par les ajouts de fines calcaires ». Séminaire International de Géomatériaux. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 10-11 Mars 2003.
- [4] Y. Benachour : « Analyse de l'influence de la variation des fillers sur les résistances du béton hydraulique ». Constantine. 1992.
- [5] M. Venuat : « La pratique des ciments, mortiers et bétons » Tome 1. Caractéristiques des liants et des bétons. Mise en œuvre des coulis et mortiers. 2^{ème} édition Moniteur. 1989.
- [6] M. Regourd : « Hydratation du ciment portland » Presse de l'ENPC. 1982.
- [7] N. Belaribi : « Analyse microstructurale du comportement différé du béton : influence de la composition ». Thèse de doctorat. INSA. LMDC. Toulouse. Avril. 1997.
- [8] EPIC/EURL « Carrière de l'ouest ». APC de Sidi Lakhdar (région de Mostaganem).
- [9] Service commercial. ENOF de Kristel (région d'Oran).