ÉTUDE DES EFFETS D'UNE ADDITION SILICEUSE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES BETONS DE SABLE.

MODELISATION DES REPONSES

Z. BOUDAOUD
Institut de Génie Civil, Centre Universitaire de M'SILA
D. BREYSSE
CDGA, BORDEAUX 1, FRANCE

Résumé

Certaines régions d'Algérie sont dépourvues de gros granulats, mais le sable de dunes y est abondant. Pour ces régions l'utilisation des bétons de sable dans le bâtiment ou la construction routière ne saurait être négligée, et ce même si les performances de ces derniers comparées à celles d'un béton ordinaire sont assez modestes.

L'addition siliceuse en co-broyage avec le clinker est une des techniques utilisées pour l'amélioration des caractéristiques des bétons de sable. Dans cet article, nous étudions les effets d'une telle addition sur la broyabilité des liants et sur les caractéristiques mécaniques des bétons de sable.

Pour planifier nos expériences et proposer des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais, nous avons utilisé la technique des plans expériences.

Mots clés

béton de sable, filler, addition siliceuse, broyabilité, plans d'expériences.

1 INTRODUCTION

De par leurs qualités, les bétons de sable ont été durant ces dernières années sujet de recherches visant à améliorer leurs performance mécaniques et rhéologiques. Le principe de ce matériau est de remplacer la partie «gros granulats» habituellement utilisée dans la fabrication des bétons ordinaires par du sable, engendrant ainsi des pertes de performances mécaniques très importantes d'autant plus si le sable utilisé est d'un caractère homométrique.

Pour améliorer la compacité des bétons de sable et éviter le remplissage total des vides par du ciment (solution coûteuse et onéreuse), plusieurs techniques ont été utilisées et parmi elles: l'addition minérale sous forme de filler.

Cet ajout se fait dans des proportions étudiées, soit au moment du malaxage du béton de sable soit au moment de la fabrication du liant par co-broyage: broyage simultané du clinker et de l'addition minérale.

La littérature qui traite des effets de l'ajout des fillers sur les résistances mécaniques des bétons est abondante. L'appréciation des résultats varie d'un auteur à un autre, car outre la nature minéralogique et la finesse du filler utilisé qui sont différentes, la technique employée pour la formulation des bétons de sable d'essais varie aussi d'un auteur à un autre [11].

Notre approche de formulation et d'étude s'inscrit dans la perspective de fabrication d'un ciment aux ajouts siliceux (sable de dunes). En utilisant la technique des plans d'expériences, nous étudions les effets induits par le cobroyage (clinker + sable) sur la broyabilité d'un tel mélange et sur les résistances mécaniques des bétons de sable.

Pourquoi une addition siliceuse ? (L'effet des fillers siliceux)

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches, ils peuvent être inertes (effet physique seul) ou actifs (effet physique et chimique en présence d'eau).

Pour l'effet du co-broyage (clinker-silice), Chauvin [21] décrit la technique publiée par le comte Nicolas de Rochefort (1918) à savoir que: si l'on broie en même temps clinker et sable dans un rapport de un pour un, on obtient un produit qui mélangé au sable naturel dans un rapport de un pour trois conduit aux mêmes résistances qu'un mélange 1/3 de clinker broyé seul et de sable. C'est à dire que l'on double les performances du ciment. Le principe physique du phénomène semble être qu'au concassage, on libère des surfaces physico-chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant [2]. Notons aussi que:

- la caractéristique commune des matériaux siliceux qui peut les classer comme pouzzolanes est essentiellement leur capacité de combiner avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau [3];
- L'expérience du co-broyage de morceaux de microsilice avec du clinker et du gypse était excellente [4];
- Le remplacement des parts de ciment par du filler augmente la vitesse d'hydratation du ciment dans les premières heures. Il a aussi un petit effet rhéologique, probablement dû à des caractéristiques chimiques de surface spécifiques du minéral [5].

En ce qui concerne les fillers siliceux (en ajout lors du malaxage du béton), une étude réalisée avec un liant composé de clinker+silice (S/(C+S)=10%) a révélé des effets positifs: Augmentation des résistances et amélioration de la compacité et de l'ouvrabilité des bétons de sable [1].

2 MÉTHODE D'ANALYSE «LES PLANS D'EXPÉRIENCES»

Dans le domaine des matériaux de construction pour acquérir des connaissances, on ne peut se passer d'une bonne campagne d'expérimentation ayant pour objectif l'obtention des informations les plus fiables en un minimum d'essais. C'est à quoi répond la méthode des plans d'expériences. Et qui permet aussi, en adoptant une stratégie expérimentale de recherche de nominale (le nombre de niveaux par t'acteur est élevé et les interactions entre facteurs ne peuvent être négligées) de générer des modèles mathématiques qui donnent la réponse du système pour une configuration quelconque des facteurs [6].

La modélisation des réponses visées est fondée sur l'estimation des effets des différentes actions (Fac-

ϕ des boulets en mm	% de boulets
50	20
40	25
30	30
25	17
20	08

Tableau 1. Pourcentage des boulets

teur et interactions), et les tests d'adéquation sur les modèles [6] et [7]. Les modèles proposés dans cet article sont en valeurs centrées réduites (v):

$$V = \frac{2V - (V^+ + V^-)}{(V^+ - V^-)}$$

Avec V^+ et V^- les valeurs extrêmes de la valeur réelle V du domaine expérimental, à qui correspond les valeurs centrées réduites +1 et -1.
Ainsi tous les coefficients du modèle possèdent alors et ce quel que soit leur plage de variation respective, la même unité, celle de la réponse. En plus du fait de la normalisation des variables, l'amplitude du coefficient multiplicateur est directement liée au degré de sensibilité de la réponse au facteur ou à l'interaction. Dans cet article, nous avons eu recours à deux types de plans d'expériences que nous définirons par la suite.

Définition des modèles expérimentaux

Les facteurs contrôlés et leurs niveaux respectifs ainsi que les types de plans d'expériences élaborés pour générer les différents modèles multi-paramétriques ont été déterminés après une première approche expérimentale. Celle-ci consistait en la réalisation de nombreux broyages de liants suivis de plusieurs formulations de bétons de sable.

3 ETUDE DE LA BROYABILITÉ

A priori, le mode de broyage (type de broyeur) intervient sur tous les facteurs définissant la géométrie des phases initiales en présence. On souligne que chaque broyeur conduit à une poudre ayant me répartition granulométrique qui lui est propre, et que les différences de formes de grains liées au type de broyeur sont mises en évidence [8].
En ce qui nous concerne et ce conformément à ce qui se fait de mieux dans l'industrie du ciment, le broyage des différents liants d'étude s'est effectué dans un broyeur à boulets de laboratoire et qui répond aux conditions suivantes: [9]

- Le volume occupé par les boulets ne doit pas dépasser 30% du volume total du broyeur;
- La charge broyante de finissage est déterminée en s'inspirant du tableau 1;
- Les particules de clinker sont pulvérisées avant leur introduction dans le broyeur.

3.1 Technique de fabrication des liants d'étude

L'objectif étant l'étude des effets du cobroyage du clinker + addition siliceuse sur les essentielles caractéristiques des bétons de sable, nous avons effectué le broyage du clinker seul, puis et selon la proportion d'addition «p» * requise dans le liant les co-broyages nécessaires à l'étude et ce en substituant à chaque fois une niasse de clinker par du sable de dunes, le même qui servira par la suite à la formulation des bétons de sable.

3.2 Procédé de Broyage utilisé

Pour un temps (t) de broyage donc pour me énergie de broyage fixée à sa borne supérieure (pour l'obtention de la finesse maximum qu'on s'est fixée au départ), et pour me masse (m) de liants nous avons effectué les différents broyages avec prises d'échantillons pour les mesures des surfaces spécifiques Blaine des liants, tout les Δt. (t_{max} = 60 minutes; Δt = 5 mn et ni = 3 kg).

3.3 du plan d'expériences

Les facteurs contrôlés sont :

- l'énergie (le temps) de broyage [En];
- la proportion d'addition minérale dans le liant IPI.

Afin de proposer un modèle prédictif fiable nous avons opté pour le plan factoriel complet, c'est-à-dire un plan d'expériences regroupant toutes les combinaisons possibles entre les niveaux de facteurs (voir tableau N° 2).
Le nombre d'essais sera N = n^k; n étant le nombre de niveaux des facteurs considérés et k le nombre de facteurs.
Puisque nous sommes dans le cas de recherche de nominale, nous avons opté pour quatre niveaux par facteur contrôlé. Ce plan d'expériences nous permet, pour l'étude de l'influence des facteurs contrôlés [E_n] et [P], de générer tous les modèles possibles (linéaires, quadratiques, et même cubiques avec toutes les interactions).

$$*P = \frac{\text{addition}}{\text{addition + clinker}}$$

Et au vu des niveaux que va prendre [P], nous avons jugé préférable de prendre le facteur: liant sur sable [L/S] comme facteur fixe (L/S = 1/3).

Essai N°	Facteur [En]		Facteur [P]	
	Valeurs réelles	Valeurs normées	Valeurs réelles	Valeurs nor
1	e_n	-1	0	-1
2	e_n	-1	1/6	-1/3
3	e_n	-1	1/3	+1/3
4	e	-1	1/2	+1
5	2 e_n	-1/3	0	-1
6	2 e_n	-1/3	1/6	-1/3
7	2 e_n	-1/3	1/3	+1/3
8	2 e_n	-1/3	1/2	+1
9	3 e_n	+1/3	0	-1
10	3 e_n	+1/3	1/6	-1/3
11	3 e_n	+1/3	1/3	+1/3
12	3 e_n	+1/3	1/2	+1
13	4 e_n	+1	0	-1
14	4 e_n	+1	1/6	-1/3
15	4 e_n	+1	1/3	+1/3
16	4 e_n	+1	1/2	+1
17	2.5 e_n	0	1/4	0

Tableau 2. Plan d'expériences pour l'étude de la broyabilité.

e_n représente cinq minutes de temps de broyage par kilogramme de matière broyée. L'essai n° 17 est l'essai au centre du domaine expérimental, il est répété trois fois pour estimer la variance de répétabilité et valider le modèle mathématique.

La quantité d'eau n'a pas été retenue comme facteur contrôlé, car si nous considérons les facteurs [E] et [E/L] comme facteurs contrôlés, le dosage en liant variera suivant les points du mélange en fonction du rapport E/L et du dosage en eau choisis et ce dans un large intervalle [10]. Aussi la quantité de liant L ne peut être considérée comme facteur contrôlé, car pour le traitement de la régression on doit rejeter les corrélations entre les facteurs [10]. Néanmoins avec le facteur contrôle [E/L], les quantités E et L sont considérées dans l'étude. Ce qui donne un nombre d'essai pour:

- le plan factoriel complet => N = 42 x 21 32 essais;
- le plan composite centré => 32 essais du plan factoriel + 02 points en étoile, plus 01 point d'essai au centre du domaine expérimental. Soit au total 35 formulations.

3.4 Définition du plan composite centré [7]

Ce type de plan est constitué de trois parties, ce qui permet une démarche séquentielle:

- un point au centre du domaine expérimental, répété plusieurs fois. Cette combinaison est utilisée pour estimer la variance de répétabilité supposée ensuite constante dans tout le champ expérimental. Ce point au centre permet aussi de valider (ou non) le modèle résultant de la régression linéaire.
- un plan orthogonal en N essai pour notre cas c'est un plan factoriel complet qui permet de générer tous les modèles possibles, du modèle linéaire jusqu'au cubique avec toutes les interactions et de tester les effets de ces dernières sur les réponses.
- les points en étoile pour [E/L]. Cette séquence permet de tester l'effet quadratique du facteur en question. Le domaine de variation du facteur [E/L] est ramené à [-α;+ α] donc cinq niveaux:

$$-\alpha;-1;\ 0;+1;+\ \alpha \text{ (avec } \alpha=\sqrt[4]{N})$$

3.5 Modélisation

La régression linéaire et les tests statistiques permettent le modèle suivant:

$$R_{c(28j)} = 27,34 - 11,21\,[P] - 5,12\,[E/L] + 4,86\,[F]$$
$$+2,51\,[P]^{*}[E/L] - 1,56\,[F]^{*}[P]$$
$$-1,43\,[F]^{*}[E/L] - 1,03[F]^{*}[F] - 1,85[P]^{*}[P] \text{ (en Mpa).}$$

Comme attendu, les niveaux élevés des facteurs [P] et [E/L] ont un effet négatif sur les réponses et les niveaux élevés de [F] ont un effet positif sur les résistances mécaniques. Notons aussi que:

- l'amélioration de la finesse du liant est d'un apport positif pour les faibles proportions d'addition siliceuse;
- les fortes proportions de [P] se conjuguent bien avec des niveaux élevés de [E/L] pour donner un effet positif sur la réponse;
- les facteurs [P] et [F] ont un effet quadratique, néanmoins nous ne pouvons conclure à ce stade de la recherche de l'existence d'optimum. Contrairement à ce qu'il peut paraître, l'activité de l'addition siliceuse n'est pas nulle, elle est plutôt appréciable pour p = 1/3 [11].

3.6 Modélisation de la finesse des liants

La régression multi-paramétrique et les tests statistiques nous donnent le modèle mathématique suivant: Finesse = 4403 + 1476 [En] + 171 [P] + 156 [E] * [P] (en cm2/g).

Ce modèle explique bien les résultats d'essais. Il montre la prépondérance du facteur énergie de broyage sur la réponse, et du fait de la présence des grains de sable siliceux la broyabilité du liant s'améliore un peu. Il y a me interaction entre les deux facteurs, l'effet de l'un dépend du niveau de l'autre.

4 MODÉLISATION DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

1. Formulation des bétons de sable et élaboration du plan d'expériences

Une fois les facteurs prépondérants et leurs niveaux respectifs déterminés, et pour l'obtention des liants nécessaires à l'étude des caractéristiques mécaniques du béton de sable, nous avons réalisé des broyages avec des niveaux d'énergie de broyage adéquat de sorte à se rapprocher le plus possible des finesses des liants requises par le plan d'expériences.

Avec ces liants, nous avons réalisé le plan d'expériences du tableau n° 3. Partant des résultats

Tableau 3. Plan composite centré

Essai N°	Valeur de l'addition [P]		Valeur de la finesse [F]		Valeur de eau/liant [E/L]		Observation
	réelle	normée	réelle	normée	réelle	normée	
1	0	-1	3000	-1	0,55	-1	
2	0	-1	3000	-1	0,70	+1	
3	0	-1	4000	-1/3	0,55	-1	
4	0	-1	4000	-1/3	0,70	+1	
5	0	-1	5000	+1/3	0,55	-1	
6	0	-1	5000	+1/3	0,70	+1	
7	0	-1	6000	+1	0,55	-1	
8	0	-1	6000	+1	0,70	+1	
9	1/6	-1/3	3000	-1	0,55	-1	
10	1/6	-1/3	3000	-1	0,70	+1	
11	1/6	-1/3	4000	-1/3	0,55	-1	
12	1/6	-1/3	4000	-1/3	0,70	+1	plan orthogonal
13	1/6	-1/3	5000	+1/3	0,55	-1	
14	1/6	-1/3	5000	+1/3	0,70	+1	plan factoriel complet
15	1/6	-1/3	6000	+1	0,55	-1	
16	1/6	-1/3	6000	+1	0,70	+1	
17	1/3	+1/3	3000	-1	0,55	-1	
18	1/3	+1/3	3000	-1	0,70	+1	
19	1/3	+1/3	4000	-1/3	0,55	-1	
20	1/3	+1/3	4000	-1/3	0,70	+1	
21	1/3	+1/3	5000	+1/3	0,55	-1	
22	1/3	+1/3	5000	+1/3	0,70	+1	
23	1/3	+1/3	6000	+1	0,55	-1	
24	1/3	+1/3	6000	+1	0,70	+1	
25	1/2	+1	3000	-1	0,55	-1	
26	1/2	+1	3000	-1	0,70	+1	
27	1/2	+1	4000	-1/3	0,55	-1	
28	1/2	+1	4000	-1/3	0,70	+1	
29	1/2	+1	5000	+1/3	0,55	-1	
30	1/2	+1	5000	+1/3	0,70	+1	
31	1/2	+1	6000	+1	0,55	-1	
32	1/2	+1	6000	+1	0,70	+1	
33	1/4	0	4500	0	0,45	$-\alpha$	Deux points en étoile
34	1/4	0	4500	0	0,80	$+\alpha$	pour le terme $[E/L]^2$
35	1/4	0	4500	0	0,625	0	**point central répété 02 fois**

de l'étude des caractéristiques du béton de sable effectuée en première approche, nous avons réalisé un plan composite centré avec trois facteurs contrôlés:

- la proportion d'addition siliceuse [P] avec quatre niveaux (P_{max} = 1/2);
- la finesse du liant [F] avec quatre niveaux (f_{max}≅6000 cm_2/g);
- le rapport eau/liant [E/L] avec deux niveaux pour le plan factoriel complet et deux points en étoile pour le plan composite centré (voir tableau n°3), car nous avons soupçonné un effet quadratique du facteur sur la réponse.

5 CONCLUSION

La substitution d'une part de clinker par du sable de dunes lors du broyage du liant diminue les performances mécaniques des bétons testés, l'augmentation de la finesse atténue cette diminution. Cette substitution permet un gain de clinker et d'énergie (inhérente à la fabrication du clinker) non négligeable, qu'il faudrait considérer en tenant compte de l'action abrasive du sable siliceux sur le broyeur. L'action de l'addition siliceuse n'est pas inerte, elle varie selon sa proportion dans le liant et selon sa finesse. Tout l'art de l'utilisateur consistera alors à trouver l'équilibre adéquat permettant des gains substantiels.

Avec les plans d'expériences, cette étude nous a permis de proposer et de valider des modèles mathématiques. Cette méthode de planification et d'analyse s'applique à merveille pour l'étude des matériaux de construction ■

BIBLIOGRAPHIE

[1] A Kronlof: «Effect of fine aggregate on concrete strength». Materials and structures, 1994.

[2] JJ. Chauvin: «Le béton de sable en Union soviétique» Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées, n° 174, 1991.

[3] DE. Luxian, M. Patino, J. Saaverda – «Structures and reactivity of various natural. silicious materials». Rilem. Congrès de Paris 1987.

[4] Bradley, Williams, «The production of microsilica» Concrete, 1986.

[5] Kjellsen, Lagerblad. B: «Influence of natural minerals in the filler fraction on hydratation and properties of mortars» CBI rapport, 1995.

[6] M. Pillet «Introduction aux plans d'expériences» Les éditions d'organisation, 1992.

[7] D. Benoît, Y. Tourbier, SG. Tourbier «Les plans d'expériences. Construction et analyse» Lavoisier, 1994.

[8] Roger, ST Thomas: «Etude de la réactivité du ciment en fonction du mode de broyage et de la dimension des particules» Rapport: CERLH, 1986.

[9] Ciments français, 1996: «Fabrication du ciment».

[10] J. BARRON, P. Ollivier: «Les bétons. Bases et données pour leur formulation». Eyrolles, mars 1996.

[11] Z Boudaoud, D. Breysse, K. Hamouche: «Experimental study of energy and aggregate saving effects using sandcrete with co-ground binders» Three-day. International symposium on sustainable development of the cement and concrete industry, October 21-23, 1998.