

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département: Génie Civil & Hydraulique
Réf :



جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences

Spécialité (Option) : Matériaux de construction

**Etudes des propriétés physico-mécaniques et
durabilité d'un béton de sable à haute
performance : expérimentation et statistique**

Présentée par :

HADJI Ben Salah

Soutenue publiquement le : 10/10/2022

Devant le jury composé de :

Dr.HACHEMI Samia	Maitre de Conférences 'A'	Présidente	Université de Biskra
Pr.BENAMARA Dalila	Professeur	Rapporteuse	Université de Djelfa
Pr.TAALLAH Bachir	Professeur	Co-Rapporteur	Université de Biskra
Dr.ZAITRI Rebih	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Djelfa
Dr.DIF Fodil	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Djelfa

Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier le dieu le tout puissant.

*Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon père
Ainsi que ma très chère mère
qui ont su être à mes côtés dans les moments difficiles sans lesquels je
n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de
bonheur qu'ils m'ont procuré, que dieu fasse je puisse les honorer.*

*À ma femme, pour la patience et le soutien dont elle a fait preuve
pendant toute la durée de cette thèse, Merci ma chérie,*

À mes chers enfants

A mes frères et mes sœurs

A toute ma grande famille

A tous mes collègues et mes amis sans exception

BEN SALAH

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier et en premier lieu mon Dieu le Tout Puissant et Miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et le courage à mener à bonne fin ce travail,

Ainsi que je remercie mes très chers parents qu'ils m'ont offert tout au long de mes études.

Mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance vont à mon Directeur de thèse Pr. D. BENAMARA et mon Co-Directeur de thèse Pr. B. TAALAH

*Pour leurs dévouements, leurs conseils et leurs soutiens moral
Tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*Mes remerciements vont aux membres de jury
D'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et
D'enrichir ce travail.*

*Je remercie tous les enseignants qui ont participé à ma formation, en
graduation et en post-graduation
Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

RESUME

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'effet des additifs minéraux sur les propriétés physico-mécaniques du béton de sable à haute performance (BSHP) en utilisant le logiciel d'analyse statistique JMP7 de SAS pour exprimer un modèle mathématique. Le ciment a été partiellement remplacé par deux ajouts minéraux, la fumée de silice (FS) et le laitier de haut fourneau (LHF), dans des proportions pouvant atteindre 20 % de la masse de ciment pour optimiser les mélanges ; Où une approche de modélisation de plans de mélange est appliquée au béton de sable pour optimiser les mélanges qui minimisent le nombre d'expériences. Cette méthode analytique est utilisée en laboratoire pour préparer 15 mélanges de béton de sable en utilisant cette technique analytique dans des combinaisons de systèmes binaires et ternaires pour estimer l'ouvrabilité, la résistance à la flexion (F_t) et la résistance à la compression (CS) du béton de sable à 7 et 28 jours. . Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de modèles dérivés basés sur l'approche par plans d'expériences grandement admettait à comprendre les interactions entre les différents paramètres des mélanges étudiés, dans ce contexte, les modèles mathématiques présentent d'excellents coefficients de corrélation ($R^2=0.96$ pour CS7 jours, $R^2=0.93$ pour CS28 jours, $R^2=0.93$ pour F_t 28 jours, et $R^2=0.95$ pour l'affaissement) pour toutes les réponses étudiées. Par ailleurs, il a été constaté aussi que l'inclusion d'additifs (FS et LHF) dans le mélange binaire BS12 et les mélanges ternaires BS8 conduit à une amélioration significative de la résistance mécanique par rapport au béton de sable de référence BS15. Ces résultats permettent d'obtenir une formulation de BSHP. A partir les résultats d'étude de la durabilité, la substitution du ciment par 10% de FS a diminué la sorptivité de 40%. Après 180 jours de conservation dans l'acide chlorhydrique HCl et dans l'acide sulfurique H_2SO_4 , les bétons BS8 et le BS12 représentent une bonne résistance à l'attaque chimique par rapport les autres bétons.

MOTS CLÉS : Béton de sable haute performance, plan de mélange, Fumée de silice, Laitier de haut fourneau, Performances mécaniques, Durabilité, Sorptivité.

Abstract

The purpose of this thesis is to evaluate the effect of the mineral additives on the physical-mechanical properties of high-Performance sand concrete (BSHP) using SAS's JMP7 statistical analysis software to express a mathematical model. The cement was partially replaced with two mineral additives, silica fume (FS) and blast furnace slag (LHF), in proportions as high as 20% of the cement mass to optimize mixtures; Where a mix design modelling approach is applied to sand concrete to optimize mixtures which minimize the number of experiments. This analytical method is used in the laboratory to prepare 15 sand concrete mixtures using this analytical technique in combinations of binary and ternary systems to estimate the workability, bending strength (Ft), and compressive strength (CS) of sand concrete at 7 and 28 days. The results obtained showed that the use of derived models based on the experimental design approach greatly assisted in understanding the interactions between the various parameters of the studied mixtures; the mathematical models present excellent correlation coefficients ($R^2=0.96$ for CS7 days, $R^2=0.93$ for CS28 days, $R^2=0.93$ for Ft28 days, and $R^2=0.95$ for slump) for all studied responses. Moreover, it was also found that the inclusion of additives (FS and LHF) in binary mixture BS12 and ternary mixtures BS8 leads to a significant improvement in mechanical strength compared to reference sand concrete BS15. These results give the possibility to obtain a formulation of BSHP. From the results of the durability study, replacing the cement with 10% FS reduced the sorptivity by 40%. After 180 days of storage in hydrochloric acid HCl and sulfuric acid H₂SO₄, BS8, and BS12 concrete offer good resistance to chemical attack compared to other concretes.

KEYWORDS: High-Performance Sand Concrete, Mixture design modeling approach, Silica fume, Blast furnace slag, Mechanical performance, durability, Sorptivity.

ملخص

لغرض من هذه الأطروحة هو تقييم تأثير الإضافات المعدنية على الخواص الفيزيائية الميكانيكية للخرسانة الرملية عالية الأداء (BSHP) باستخدام برنامج التحليل الإحصائي SAS's JMP7 للتعبير عن نموذج رياضي. تم استبدال الأسمنت جزئيًا بمضافتين معدنيتين، دخان السيليكا (FS) وخبث الفرن العالي (LHF)، بنسب تصل إلى 20٪ من كتلة الأسمنت لتحسين الخلائط؛ حيث يتم تطبيق نهج نمذجة تصميم المزيج على الخرسانة الرملية لتحسين الخلائط التي تقلل من عدد التجارب. تستخدم هذه الطريقة التحليلية في المختبر لإعداد 15 خلطة خرسانية رملية باستخدام هذه التقنية التحليلية في مجموعات من الأنظمة الثنائية والثلاثية لتقدير قابلية التشغيل وقوة الانحناء (Ft) وقوة الانضغاط (CS) للخرسانة الرملية في 7 و 28 يومًا. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن استخدام النماذج المشتقة المعتمدة على أسلوب التصميم التجريبي ساعد بشكل كبير في فهم التفاعلات بين المتغيرات المختلفة للخلائط المدروسة. تقدم النماذج الرياضية معاملات ارتباط ممتازة ($R^2 = 0.96$ لـ CS7، $R^2 = 0.93$ لـ CS28، $R^2 = 0.93$ لـ Ft28، و $R^2 = 0.95$ للركود) لجميع الاستجابات المدروسة. علاوة على ذلك، وجد أيضًا أن إضافة المواد المضافة FS و LHF في الخليط الثنائي BS12 والخلائط الثلاثية BS8 يؤدي إلى تحسن كبير في القوة الميكانيكية مقارنة بالخرسانة الرملية المرجعية BS15 تعطي هذه النتائج إمكانية الحصول على تركيبة BSHP. من نتائج دراسة الديمومة، أدى استبدال الأسمنت بـ 10٪ من FS إلى تقليل الامتصاص الشعيري بنسبة 40٪. بعد 180 يومًا من التخزين في حمض الهيدروكلوريك HCL وفي حامض الكبريتيك H_2SO_4 ، أظهرت الخرسانة BS8 و BS12 مقاومة جيدة للهجوم الكيميائي مقارنة بالخرسانة الأخرى.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية عالية الأداء، نهج نمذجة تصميم الخليط، دخان السيليكا، خبث الفرن العالي، الأداء الميكانيكي، الديمومة، الامتصاص الشعيري.

Table des matières

Résumé	II
Abstract	III
ملخص	IV
Table des matières	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XII
INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I:GENERALITES SUR LE BETON DE SABLE	6
I.1. INTRODUCTION	6
I.2. HISTORIQUE DES BETONS DE SABLE	6
I.3. DEFINITION.....	8
I.4. COMPOSANTS DU BETON DE SABLE.....	8
I.4.1. Les sables.....	8
I.4.2. Le ciment	9
I.4.3. Les adjuvants	10
I.4.3.1. Les super plastifiants	10
I.4.4. Les ajouts cimentaires	10
I.4.4.1. Fumée de silice.....	10
I.4.4.2. La pouzzolane	11
I.4.4.3. Le laitier	12
I.4.4.4. Filler calcaire.....	12
I.4.4.5. L'eau de gâchage	12
I.4.4.6. Autres ajouts.....	13
I.5. PROPRIETES SPECIFIQUES DES BETONS DE SABLE	14
I.6. LIMITES DES BETONS DE SABLE.....	14
I.7. METHODES DE FORMULATIONS	15
I.8. DOMAINE D'UTILISATION DES BETONS DE SABLE.....	16
I.9. LES TECHNIQUES UTILISEES POUR AMELIORER LES PROPRIETES DES BETONS DE SABLE.....	17
I.9.1. Amélioration par correction granulaire	17
I.9.2. Amélioration par des ajouts cimentaires	18
I.9.3. Amélioration par compactage	19
I.9.4. Amélioration par ajout de fibres	20
I.9.5. Amélioration par l'addition (ajout cimentaire + superplastifiant+ diminution E/L)	21
I.10. DURABILITE DES BETONS DE SABLE	23
I.11. CONCLUSION.....	24

CHAPITRE II: PLANS D'EXPERIENCE ET METHODES DE FORMULATION DES BETONS DE SABLE	26
II.1. INTRODUCTION	26
II.2. METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE	26
II.2.1. Définition.....	26
II.2.2. Approche du Plan de mélange	27
II.2.3. Contrainte fondamentale des mélanges.....	27
II.2.4. Représentation géométrique des mélanges.....	28
II.2.4.1. Plans de mélange en réseaux	30
II.2.4.2. Plans de mélange centrés.....	31
II.2.4.3. Plans de mélange centrés augmentés	32
II.2.5. Modèles mathématiques des plans de mélanges.....	32
II.2.6. Système d'équations	33
II.2.7. Notions de statistiques.....	33
II.2.7.1. Erreur expérimentale	34
II.2.7.2. Moyenne	34
II.2.7.3. Variance.....	34
II.2.7.4. Ecart type.....	34
II.2.7.5. Intervalle de confiance des réponses	34
II.2.7.6. Coefficient de détermination (R^2)	35
II.2.7.7. Résidus	35
II.2.7.8. P-value.....	35
II.3. EXEMPLES D'APPLICATIONS DE PLANS DE MELANGES.....	35
II.4. APPROCHES DE LA FORMULATION DU BETON DE SABLE	38
II.4.1. Approche de B.COURET en 1982	38
II.4.2. Approche de P.DELUDE en 1984	39
II.4.3. Approche de GUINEZ, GLUAIS et DELUDE en 1984	41
II.4.4. Approche de J.J.CHAUVIN en 1987	42
II.5. METHODES DE FORMULATION D'UN BETON DE SABLE.....	43
II.5.1. Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable.....	44
II.5.2. Méthode expérimentale de formulation	47
II.5.2.1. Les différentes étapes de la formulation	47
II.6. CONCLUSION	49
CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTALE	51
III.1. INTRODUCTION.....	51
III.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	51
III.2.1. Ciment.....	51
III.2.2. Sable.....	52
III.2.2.1. Granulométrie (NFP 18-560)	53
III.2.2.2. Propriétés physiques du sable.....	54
III.2.2.3. Analyse par DRX du sable	54
III.2.3. Gravier	55

III.2.4. Superplastifiant (SP).....	56
III.2.5. Eau de gâchage.....	56
III.2.6. Laitier à haute fourneau.....	57
III.2.7. Fumé de silice.....	57
III.3. FORMULATION BETON DE SABLE.....	58
III.3.1. Étapes de la formulation.....	58
III.3.1.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition.....	58
III.3.1.2. Choix de la teneur en ciment.....	58
III.3.1.3. Fixation d'une teneur en eau.....	58
III.3.1.4. Détermination du dosage en sable.....	59
III.3.1.5. Détermination du dosage en gravier.....	59
III.3.1.6. Ajustement de la maniabilité.....	60
III.3.2. Procédures d'essais.....	60
III.3.2.1. Malaxage.....	60
III.3.2.2. Maniabilité.....	61
III.3.2.3. Les éprouvettes utilisées.....	64
III.3.2.4. Durcissement des échantillons.....	65
III.3.2.5. Essai de la résistance à la compression.....	66
III.3.2.6. Essai de la résistance à la traction par flexion.....	66
III.4. CONCLUSION.....	67
CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	69
IV.1. INTRODUCTION.....	69
IV.2. BETON DE SABLE TEMOIN ADOPTE.....	69
IV.3. PLAN DE MELANGE.....	71
IV.4. EXPLOITATION DES RESULTATS DU PLAN DE MELANGE.....	74
IV.4.1. Modélisation de l'affaissement.....	74
IV.4.2. Résistance à la flexion.....	77
IV.4.3. Résistance à la compression.....	81
IV.5. CONCLUSION.....	87
CHAPITRE V : ÉTUDE DE LA DURABILITE.....	90
V.1. INTRODUCTION.....	90
V.2. ESSAIS DE DURABILITE.....	90
V.2.1. Essai de l'absorption capillaire (sorptivité).....	91
V.2.2. Essai de dégradation dans les acides HCl et H ₂ SO ₄	92
V.2.3. Eau douce.....	93
V.2.4. Perte de masse.....	93
V.3. RÉSULTATS ET COMMENTAIRES.....	93
V.3.1. Absorption capillaire (la sorptivité).....	93
V.3.2. Résistance à l'attaque chimique H ₂ SO ₄ et HCl.....	96
V.3.2.1. Milieu de l'acide chlorhydrique HCl.....	97
V.3.2.2. Milieu de l'acide sulfurique H ₂ SO ₄	99
V.4. CONCLUSION.....	102

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	105
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	108
ANNEXES	115
ANNEXE 01 :	115
TRAITEMENT DE PROBLÈMES DE MÉLANGE AVEC JMP7.....	115
ANNEXE 02 :	123
FICHE TECHNIQUE DU SUPERPLASTIFIANT.....	123
ANNEXE 03 :	125
FICHE TECHNIQUE DU FUMEE DE SILICE	125

Liste des figures

Figure I. 1. <i>Phare de Port-Saïd (Égypte)</i>	7
Figure I. 2. <i>Carte de déserts dans le monde</i>	8
Figure I. 3. <i>Microstructure du fumé de silice 20 000X (forme sphérique)</i>	11
Figure I. 4. <i>Microstructure du pouzzolane 5 000X</i>	11
Figure I. 5. <i>Microstructure du laitier de haut fourneau 5000X</i>	12
Figure I. 6. <i>Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire</i>	13
Figure I. 7. <i>Béton de sable avec colorant</i>	14
Figure I. 8. <i>Béton de sable compactant au roulant</i>	20
Figure II. 1. <i>Présentations des mélanges à deux constituants sur un segment de droite</i>	28
Figure II. 2. <i>Présentations des mélanges à trois constituants</i>	29
Figure II. 3. <i>Présentations des mélanges à quatre constituants par un tétraèdre régulier</i>	29
Figure II. 4. <i>Plan de mélange ne comportant que les trois produits purs</i>	30
Figure II. 5. <i>Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié. Ce plan est noté {3,2}</i>	30
Figure II. 6. <i>Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges 1/3, 2/3 et 1/3, 1/3, 1/3 ce plan est noté {3,3}</i>	31
Figure II. 7. <i>Plan de mélange centré (Simplex-centroid designs)</i>	32
Figure II. 8. <i>Plan de mélange centré augmenté (Augmented Simplex-centroid)</i>	32
Figure II. 9. <i>Les courbes iso-réponses de la résistance mécanique à 7 jours et à 28 jours</i>	36
Figure II. 10. <i>Courbes iso réponses de Cs7 et Cs28</i>	37
Figure II. 11. <i>La courbe iso réponse de la résistance à la compression (Mpa) en fonction des proportions SR, SC et SD</i>	38
Figure II. 12. <i>Courbe représentative de la variation du temps du temps d'écoulement en fonction du rapport volumétrique F/S</i>	40
Figure II. 13. <i>Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique. Filler 2 plus fin que filler</i>	43
Figure II. 14. <i>Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.</i>	45
Figure II. 15. <i>Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable</i>	46
Figure III. 1. <i>Image du ciment utilisée</i>	52
Figure III. 2. <i>Image du sable utilisé</i>	53
Figure III. 3. <i>Observation microscopique du sable utilisé</i>	53
Figure III. 4. <i>Courbe d'analyse granulométrique du sable.</i>	53
Figure III. 5. <i>Diffraction des rayons X de sable</i>	54

Figure III. 6. <i>Image de gravier 3/8 utilisé</i>	55
Figure III. 7. <i>Courbe d'analyse granulométrique de gravier 3/8</i>	55
Figure III. 8. <i>Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW30</i>	56
Figure III. 9. <i>Image du malaxeur de béton utilisé</i>	61
Figure III. 10. <i>Procédure de malaxage du béton de sable</i>	61
Figure III. 11. <i>Principe de fonctionnement du maniabilimètre LCL (B)</i>	62
Figure III. 12. <i>Essai au maniabilimètre</i>	63
Figure III. 13. <i>Essai d'affaissement au cône d'Abrams</i>	64
Figure III. 14. <i>Moules pour éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm</i>	64
Figure III. 15. <i>Image de la table vibrante</i>	65
Figure III. 16. <i>Image des éprouvettes conservées dans l'eau</i>	65
Figure III. 17. <i>Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression</i>	66
Figure III. 18. <i>Dispositif de l'essai traction par flexion</i>	67
Figure IV. 1. <i>Substitution de ciment par des ajouts minéraux.</i>	71
Figure IV. 2. <i>Représentation triangulaire des 15 combinaisons étudiées à trois constituants</i>	72
Figure IV. 3. <i>Graphe des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites du l'affaissement (Graphe d'ajustement du modèle)</i>	75
Figure IV. 4. <i>Résidus VS Affaissement prévus</i>	75
Figure IV. 5. <i>Courbes iso-réponses de l'affaissement</i>	76
Figure IV. 6. <i>Graphe des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites de la résistance à la flexion à 28 jours (Graphe d'ajustement du modèle)</i>	78
Figure IV. 7. <i>Résidus VS Ft prévus à 28 jours</i>	78
Figure IV. 8. <i>Fonction de désirabilité pour l'optimisation de la résistance à la flexion à 28 jours</i>	79
Figure IV. 9. <i>Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion à 28 jours</i>	80
Figure IV. 10. <i>Graphe des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites de la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours (Graphe d'ajustement du modèle)</i>	82
Figure IV. 11. <i>Résidus VS CS7 prévus</i>	83
Figure IV. 12. <i>Résidus VS CS28 prévus</i>	83
Figure IV. 13. <i>Fonction de désirabilité pour l'optimisation de la résistance à la compression</i>	85
Figure IV. 14. <i>Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours</i>	86
Figure IV. 15. <i>Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours</i>	87
Figure V. 1. <i>Principe de mesure de l'absorption capillaire (sorptivité)</i>	91
Figure V. 2. <i>Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5%HCl et 5% H₂SO₄</i>	92
Figure V. 3. <i>Coefficients de sorptivité</i>	94
Figure V. 4. <i>La sorptivité S vs la résistance à la compression CS28</i>	95
Figure V. 5. <i>Conservation des éprouvettes dans l'eau douce</i>	96

Figure V. 6. <i>Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans d'eau</i>	97
Figure V. 7. <i>Conservation des éprouvettes dans la solution d'acide chlorhydrique 5%HCL</i>	98
Figure V. 8. <i>Aspect des éprouvettes après 180 jours dans l'acide chlorhydrique HCL</i>	98
Figure V. 9. <i>Perte de masse dans l'acide chlorhydrique 5% HCl</i>	99
Figure V. 10. <i>Conservation des éprouvettes dans la solution d'acide sulfurique 5%H_2SO_4</i>	100
Figure V. 11. <i>Aspect des éprouvettes après 180 jours dans l'acide sulfurique H_2SO_4</i>	101
Figure V. 12. <i>Perte de masse dans l'acide sulfurique 5% H_2SO_4</i>	101

Liste des tableaux

Tableau II. 1. <i>Formulation de B.couret</i>	38
Tableau II. 2. <i>Résistances comparatives entre le mortier iso et le béton de sable</i>	39
Tableau II. 3. <i>Formulation et performances obtenu par l'approche de B.couret</i>	39
Tableau II. 4. <i>Formulation et performances obtenu par l'approche de P.DELUDE</i>	40
Tableau II. 5. <i>Formulation et performances obtenu par l'approche de GUINEZ et al en 1er étape</i> ...	41
Tableau II. 6. <i>Formulation et performances obtenu par l'approche de GUINEZ et al en 2^{ème} étape</i> ..	42
Tableau II. 7. <i>Formulation et performances obtenu par l'approche de GUINEZ et al en 3^{ème} étape</i> ..	42
Tableau II. 8. <i>Formulation et performances obtenu par l'approche de J.J.CHAUVIN</i>	43
Tableau III. 1. <i>Propriétés physico-mécaniques de ciment</i>	52
Tableau III. 2. <i>Composition chimique de ciment</i>	52
Tableau III. 3. <i>Composition minéralogique de ciment (%)</i>	52
Tableau III. 4. <i>Propriétés physiques du sable</i>	54
Tableau III. 5. <i>Propriétés physiques de gravier</i>	55
Tableau III. 6. <i>Analyse minéralogique de l'eau de gâchage</i>	56
Tableau III. 7. <i>Composition chimique du laitier haute fourneau</i>	57
Tableau III. 8. <i>Composition chimique du Fumée de silice</i>	57
Tableau III. 9. <i>Squelette granulaire adopté pour 1m³ de béton de sable</i>	59
Tableau III. 10. <i>Compositions des bétons chargés utilisés.</i>	59
Tableau III. 11. <i>Composition du béton de sable témoin</i>	60
Tableau IV. 1. <i>Les compositions finales des bétons chargés utilisés</i>	70
Tableau IV. 2. <i>Composition finale du béton de sable témoin utilisé</i>	70
Tableau IV. 3. <i>Proportions des facteurs dans les compositions étudiées</i>	73
Tableau IV. 4. <i>Formulations des mélanges selon le plan de mélange</i>	73
Tableau IV. 5. <i>Résultats de l'essai d'affaissement</i>	74
Tableau IV. 6. <i>Estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées</i>	76
Tableau IV. 7. <i>Résultats des essais de la résistance à la flexion à 28 jours</i>	77
Tableau IV. 8. <i>Estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées</i>	79
Tableau IV. 9. <i>Résultats des essais de la résistance à la compression à 7 et 28 jours</i>	81
Tableau IV. 10. <i>Estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées</i>	84
Tableau V. 1. <i>Compositions du BS choisie pour la durabilité</i>	90

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1) Problématique

La gamme des bétons est très étendue globalement, pour un usage déterminé et une fabrication courante. Des expériences précédentes ont montré que les bétons ordinaires et les bétons de sable relèvent de la même technologie et présentent des propriétés générales très voisines. Le choix de béton de sable comme un matériau de construction, il répond aux critères en termes de performances mécaniques et durabilité et aussi l'esthétique et de comportement.

Les performances mécaniques du béton ne constituent pas l'unique critère de jugement de la qualité du béton et donc un nombre de propriétés spécifiques des bétons de sable les rendent préférentiels pour certains usages. Toutefois, la classification des bétons de sable selon leur performance mécanique en particulier leur résistance en compression à 28 jours reste un critère déterminant pour leur utilisation. D'une manière générale, les performances mécaniques du béton de sable sont inférieures à celle des bétons ordinaires. [1].

Les développements récents en technologie des ciments et des ajouts cimentaires (fumée de silice, pouzzolane naturelle ...) et des superplastifiants a mené à la production du béton à haute résistance (atteignant 90 MPa) peuvent être obtenues pour répondre à des exigences mécaniques précises, sa haute résistance est une fonction inverse de son contenu de vide total.

La formulation du béton de sable à haute performance (BSHP) a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons dans les régions riches en différent types des sables. Vu l'intérêt que peut présenter ce nouveau béton dans la classe des matériaux de construction, il serait très intéressant à travers de ce travail de voir la possibilité d'élaborer un modèle mathématique qui permet de formuler un béton de sable à haute performance .En utilisant des additifs minéraux de tenter d'améliorer certaines caractéristiques pour lui assurer sa valeur économique et d'obtenir une bonne performance mécanique surtout que le sud Algérien est parmi les régions qui riches en sable.

2) Objectif de l'étude

Les bétons de sable à haute performance, sont de nouveaux bétons se caractérisant par un diamètre de particules ne dépassant pas 5 mm, les résistances mécaniques et la durabilité sont très élevées[1]. Le présent travail consiste, de formuler un béton de sable à haute

performance et d'amélioration certaines caractéristiques jusqu'à atteint une bonne résistance mécanique avec une durabilité adéquate.

Cette étude présente les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences a été utilisée afin d'optimiser des BSHP formulés à base de matériaux locaux de la région de Messaad, wilaya de Djelfa (Algérie).

Cependant pour passer de BS au BSHP, il faut une étude approfondie des paramètres de formulation (rapport eau /liant équivalent, type du ciment et son dosage, type et quantité du super plastifiant et les ajouts minéraux). Un plan de mélange à plusieurs paramètres a été utilisé afin de modéliser les formulations optimales qui donnent les résistances maximales pour chaque type de béton. Grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7 de Statistical American Systems SAS-Institute, des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais, en particulier la maniabilité et les propriétés mécaniques, ont été déterminés et développés dans ce travail. Ces modèles mathématiques ainsi obtenus permettent en fait la prédiction de l'effet de chacun des facteurs étudiés, séparément et en combinaison, sur les propriétés des BSHP. Par ailleurs, des essais de durabilité consistent à suivre le comportement à long terme des certaines compositions de béton, dans des milieux plus ou moins agressifs.

3) Méthodologie

La présente thèse est organisée en Cinq chapitres :

Chapitre I : est consacrée à une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives au béton de sable qui commence par un aperçu historique sur ce type de béton, puis fait le point sur les différentes caractéristiques de sa composition ainsi que la présentation de domaine d'utilisation et les différentes techniques utilisées pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques.

Chapitre II : est scindé en deux parties, la première partie consiste à exposer l'approche des plans de mélange et les notions statistiques appliquées dans ce type de plans d'expérience avec quelques exemples d'applications. Et la deuxième partie va porter sur quelques approches de formulation des bétons de sable, une approche théorique basée sur l'optimisation de la compacité de squelette granulaire, et l'approche expérimentale basées sur la réalisation de gâchées successives.

Chapitre III : consiste à présenter tout d'abord les caractéristiques des constituants utilisés, dans une seconde partie une explication de la procédure expérimentale approuvée y

compris les formulations des bétons, puis une description des différentes expériences effectuées au cours de ce travail.

Chapitre IV : présente l'analyse et la discussion des différents résultats obtenus au cours de cette étude. Nous utilisons l'approche de plan de mélange à plusieurs paramètres afin de modéliser les formulations optimales qui donnent les résistances maximales pour chaque type de béton. Grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7, des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais, en particulier la maniabilité et les propriétés mécaniques, ont été déterminés et développés dans ce travail.

Chapitre V : est pour évaluation de la durabilité de béton de sable à hautes performances vis-à-vis l'attaque chimique, l'effet des ajouts sur l'absorption capillaire et sur la dégradation du béton dans les milieux agressifs (HCl et H₂SO₄) après 30, 90, et 180 jours d'immersion totale.

La thèse est enfin clôturée par une conclusion générale qui comporte une synthèse des résultats obtenus avec quelques perspectives pour les futures améliorations du champ de la recherche investiguée.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE BETON
DE SABLE

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE BETON DE SABLE**I.1. INTRODUCTION**

Les régions sahariennes dépourvues des matériaux pierreux sont par contre très riches en sable. La construction des structures en béton armé et des routes exige donc, dans ces régions, un approvisionnement en granulats grossiers qui est onéreux et très coûteux ce qui a beaucoup freiné le développement de ces régions.

Aussi ne serait-il pas possible de concevoir une formulation de béton de sable qui, moyennant une composition particulière et une mise en place spéciale, permettrait à dosage en ciment égal à celui d'un béton ordinaire à granulats grossiers, d'atteindre des performances mécaniques analogues et des déformations parasites (retrait, fluage) qui restent admissibles.

I.2. HISTORIQUE DES BETONS DE SABLE

Les origines du béton de sable remontent au milieu du XIXe siècle en France, où F. Coignet inventa le "béton aggloméré" puis ce matériau fut mis au point et utilisé dans la maison de Saint-Denis dans laquelle le mélange composite de sable, le ciment, la chaux et l'eau ont été adoptés. C'était la première application de cette technique ; un matériau similaire a également été trouvé dans le bâtiment de la tour de Port-Saïd en Égypte ([Figure I. 1](#)), qui mesure 52 mètres de haut et dans le pont de New York. Certains tronçons du canal de la Vanne (construits entre 1869 et 1872) ont également été construits selon cette technique qui constituent les premières tentatives de corrections granulaires adoptées par F. Coignet en mélange avec du sable fin conventionnel [1].

Cette technologie a été développée il y a des décennies dans l'ex-Union soviétique, comme en témoignent les réalisations du port de Kaliningrad et du pont Chernavskif. Cette technique fut reprise plus tard par le professeur Rebinder, durant la seconde guerre mondiale, ce matériau fut utilisé dans de nombreux domaines (aéroports, trottoirs, tours architecturales, sols, dalles, etc.). A cette époque, certains tests technologiques (paramètres granulométriques,

précision du liant, réducteurs d'eau et modèles de vibration) s'appuyaient sur du béton à base de sable.



Figure I. 1. *Phare de Port-Saïd (Égypte)*

Le béton à base de sable a connu un renouveau dans la recherche et le développement à la fin du XXe siècle en France où un projet appelé "SABLOCRETE" (partie du programme d'optimisation des matériaux locaux) a été créé en 1988 en France. Ce projet a mis en évidence des propriétés spécifiques du béton de sable (BS) qui ne sont pas bien assurées par le béton conventionnel afin d'avoir une bonne maniabilité et de bonnes performances mécaniques et lui donner une place à part entière dans le groupe des bétons [1], [2].

Les pays d'Afrique du Nord contiennent de vastes étendues de sable désertique qui n'ont pas été sérieusement utilisées dans la construction. Les quantités de gravats, notamment les sables adaptés au béton, ne répondent pas aux besoins de ces pays. [3]–[5]

En Algérie, la demande de granulats a considérablement augmenté par rapport aux travaux de construction et d'aménagement initiés au cours de la dernière décennie. Dans le sud algérien, l'utilisation raisonnable des granulats disponibles au niveau national et l'évaluation des ressources existantes sont essentielles, car les gros granulats sont peu disponibles et coûteux pour le transport depuis d'autres régions [6].

Etant donné l'abondance de sable de dunes, particulièrement dans les déserts de Sahara qui occupe une grande partie du territoire Algérien (**Figure I. 2**), l'idée de promouvoir sa valorisation dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique. En Algérie, l'intérêt à la valorisation du sable de dunes dans les bétons, notamment dans le béton de sable (BS) est apparu dans la fin des années 80 [7].



Figure I. 2. Carte de déserts dans le monde [8]

I.3. DEFINITION

Le béton de sable est un béton fin constitué par mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; outre ces composants de base, le béton de sable comporte habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s).

Le béton de sable, défini par la norme NF P 18-500 [9], se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable(s), l'absence ou le faible dosage de gravillons et l'incorporation d'addition(s).

L'incorporation de gravillon d/D autorise l'appellation (béton de sable) tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0.7 (G = gravillon ; S = sable) on parle alors de béton de sable chargé [9].

I.4. COMPOSANTS DU BETON DE SABLE

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajout, 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 [9].

I.4.1. Les sables

Le terme sable désigne tout granulat alluvionnaire, de ballastière ou concassé conforme aux normes P18-541 [10], P18-302 ou NF18-309. Ce sont des matériaux inertes qui fait partie

dans la composition des bétons et mortiers. Les sables peuvent s'écarter de la norme P18-541 [10] ou la compléter par les points suivants [1] :

- Granulométrie : le module de finesse des sables ne doit pas différer de la valeur nominale au-delà de + ou - 20%).
- Homogénéité : le coefficient d'homogénéité (H) supérieur ou égal à 90% pour $\alpha = 0.4$.
- La teneur maximale des éléments inférieurs à 0.08 mm peut être portée à 20% pour la valeur supérieure spécifiée et à 25% pour la valeur limite absolue, lorsque ces éléments constituent les seuls éléments fins du béton de sable.

L'équivalent de sable doit être supérieur ou égal à 75% si le sable est roulé et supérieur ou égal à 65 % s'il est broyé. La propreté constitue le critère déterminant d'emploi du sable quelles que soient sa nature et son origine. En outre, aucun critère granulométrique n'est exigible a priori pour réaliser un béton de sable. Les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau ; ce qui entraîne une chute de résistance.

En pratique, il est plus prudent de se limiter à l'utilisation de sables propres tels que définis pour les formules de béton classique. A ce titre, les sables de plage ou des dunes pourraient alors être utilisés [11].

I.4.2. Le ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables forment avec l'eau une pâte capable par hydratation de faire prise et de durcir progressivement d'où le nom de liants hydrauliques.

Comme dans les bétons classiques, le ciment adopté pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301 [12]. Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, on privilégiera souvent les CPA par rapport aux CPJ car, dans le cas des ciments composés, il n'est pas toujours facile de calculer le rapport E/C exact puisque la quantité exacte de ciment n'est pas connue de façon précise. Le choix du ciment en général dépend des résistances mécaniques désirées, des caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon globale, de l'usage auquel le béton est destiné. L'annexe B de la norme NF P 98-170 [13] précise les caractéristiques souhaitables pour le ciment en fonction de la nature pétrographique des granulats (sables et gravillons) et de la température ambiante au moment du chantier [11].

I.4.3. Les adjuvants

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 plastifiant ou super plastifiant : 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 EN 934-2-A2 [14].

I.4.3.1. Les super plastifiants

Les super plastifiants 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 poly naphthalène sulfoné, et les sels de sodium de la poly mélamine sulfonée. Les super plastifiants 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 super plastifiant permet d'abaisser la teneur en eau de 10 à 30% tout en maintenant une même maniabilité.

I.4.4. Les ajouts cimentaires

I.4.4.1. Fumée de silice

La fumée de silice, également appelée micro silice ou fumée de silice condensée, est un sous-produit utilisé comme pouzzolane. Elles sont formées de particules sphériques très fines (de 0,01 à quelques microns) à très haute teneur en silice amorphe (> 85% en masse) (**Figure I. 3**). Leur utilisation confère au béton une meilleure compacité et une porosité finale faible. Ainsi, les solutions chimiquement agressives circulent moins librement dans le réseau poreux du béton, améliorant la durabilité de ce dernier [11] [15].

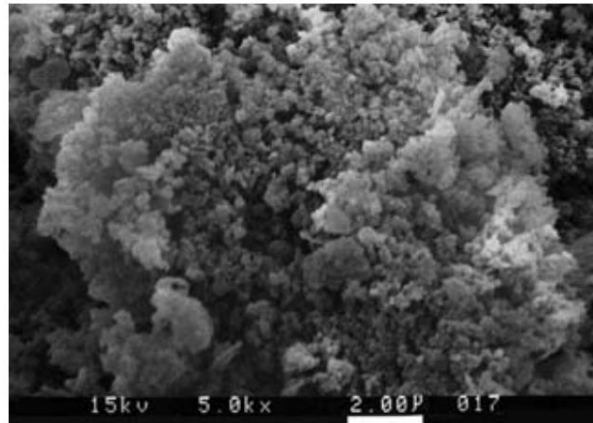


Figure I. 3. *Microstructure du fumé de silice 20 000X (forme sphérique)[15]*

I.4.4.2. La pouzzolane

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers : Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins-agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland [16].

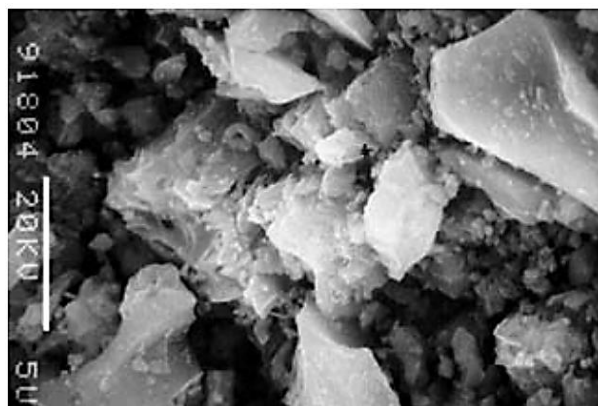


Figure I. 4. *Microstructure du pouzzolane 5 000X [15]*

I.4.4.3. Le laitier

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers 1550°C (2730°F) au-dessus de la fonte [16].

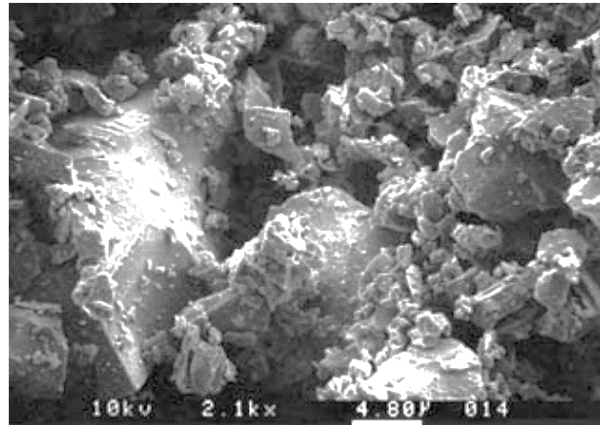


Figure I. 5. *Microstructure du laitier de haut fourneau 5 000X* [15]

I.4.4.4. Filler calcaire

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas $80\ \mu\text{m}$, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables.

L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, 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 [17].

I.4.4.5. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P15-303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions d'adjuvants et autres ajouts et surtout par les sables [1].

I.4.4.6. Autres ajouts

A. Les fibres :

Elles 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 pour limiter les effets de retrait. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe [1].

B. Les gravillons

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable, et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même, l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique (Figure I. 6).

En pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massive G/S (gravillon/sable) reste inférieur à 0.7 [1].

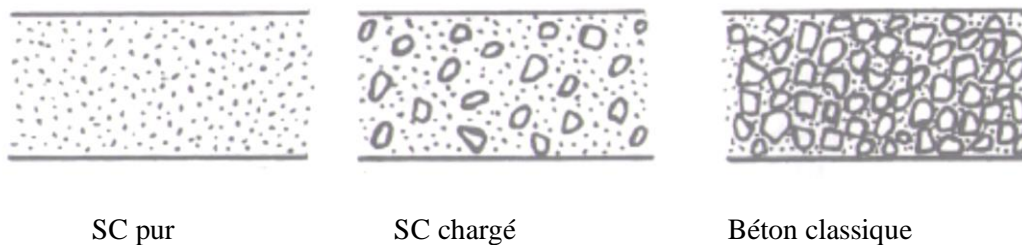


Figure I. 6. Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire [1]

C. Les colorants

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants habituellement utilisés dans le béton classiques peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps, pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas [1].



Figure I. 7. *Béton de sable avec colorant* [18]

I.5. PROPRIETES SPECIFIQUES DES BETONS DE SABLE

Les bétons de sable sont intéressants en particulier sur les points suivants [1]:

- Maniabilité : possibilité d'augmenter la longueur de pompage, de diminuer l'énergie de mise en place et d'une façon générale, de faciliter la mise en œuvre.
- Cohésion et absence de ségrégation : intéressantes pour les travaux en site aquatique, le coulage en place des pieux, etc.
- Petite granularité : utile dans les travaux d'injection ou le bétonnage de milieu à forte densité de ferrailage. Cette qualité est recherchée dans les travaux de rénovation de structures anciennes ou pour le remplissage de structures neuves.
- Bel aspect de surface : le souci esthétique est de plus en plus pris en compte dans toutes les constructions. Les bétons de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect.

I.6. LIMITES DES BETONS DE SABLE

Dans l'état actuel des connaissances et de l'art, les bétons de sable ne peuvent pas prétendre au remplacement systématique des bétons traditionnels, que ce soit pour des raisons économiques ou pour des raisons techniques [1], [17].

- Raisons économiques :

Les expériences ont montré que par des séries d'ajout, les résistances d'un béton de sable peuvent être augmentées de façon spectaculaire. Cependant dans certains cas, la multiplication du nombre des ajouts n'est pas sans incidence sur le coût des formules et dans la

mesure où le béton de sable n'apporte pas un (plus) dans l'usage envisagé, son emploi pourra ne présenter que peu d'intérêt sur le plan économique par rapport au béton traditionnel.

Tout sera fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage concerné.

➤ Raisons techniques :

Il existe encore un manque des connaissances sur les caractéristiques et sur le comportement des bétons de sable, en particulier :

- si les bétons de sable ont le même niveau de retrait que le béton classique, leur module d'élasticité reste inférieur de 20 à 30 %.

- il existe peu d'éléments sur le comportement des bétons de sable au fluage ce qui les exclut dans l'immédiat des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints.

Les données sur la durabilité même si elles sont rassurantes sont encore peu nombreuses. Cependant il est fait souvent référence aux réalisations en béton de sable plus que centenaies (aqueduc de la Vanne, en région parisienne sur une section de plus de 40 km ; phare de Port-Saïd en Egypte ; grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris, etc.

I.7. METHODES DE FORMULATIONS

La composition d'un béton à l'heure actuelle consiste, dans la détermination des diverses quantités de granulat (sable, graviers, cailloux), de ciment, d'eau, d'adjuvants chimiques et d'ajouts minéraux qu'il est nécessaire de mettre en présence pour obtenir un mètre cube de béton [1].

Les critères essentiels qui doivent guider cette étude sont : les résistances mécaniques à obtenir, l'ouvrabilité et la durabilité.

Les méthodes de composition ne conduisent pas toutes au même résultat, car chacune d'elles doit pour simplifier s'appuyer sur quelques hypothèses qui ne sont pas toujours les mêmes. Ne signalons néanmoins qu'aucune d'entre elles n'aboutit à coup sûr à une composition exacte. Ceci est dû aux paramètres influant sur le béton qui sont très nombreux et difficilement appréciables.

De nombreuses méthodes de composition sont proposées dans la littérature. Elles aboutissent à des dosages pondéraux ou volumiques. Parmi les méthodes les plus utilisées, on retrouve celles de Faury (1962), Joisel (1952), Valette (1963), Dreux (1970), Dreux Gorisse,

Bolomy, Abrams, Baron-Lesage (1976), ainsi que les méthodes Anglo-Saxonnes (BSI, ASTM, ...). Toutes ces méthodes se réfèrent aux travaux de Feret (1892 – 1896) et Caquot (1936).

Il existe de nouvelles méthodes qui sont destinées à l'optimisation de la composition des bétons de haute performance BHP (ACI 1984, De Larrard 1988) [19].

Dans le cas du béton de sable fibré, la formulation présente une grande difficulté par rapport à celle d'un béton ordinaire car on ne peut pas optimiser séparément la compacité du squelette granulaire. Cette compacité est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspondant complément à l'unité de la porosité. D'autre part les différentes méthodes de composition existantes ne tiennent pas compte des fibres comme un composant [20].

Serna Rossa [21] mis au point une composition optimale de béton fibré, proche des formulations courantes, et pouvant être reproduite dans n'importe quel chantier. Pour ce faire il a appliqué la méthode de Baron-Lesage.

Les études menées dans le cadre de Project national Français SABLOCRETE[1], ont présenté deux types d'approches adaptées de la méthode de Baron-Lesage , pour formuler les bétons de sable : l'une théorique et l'autre expérimentale :

- approche théorique : conduit à ajuster la composition du squelette minéral sur une courbe pour atteindre un arrangement de compacité maximale.

- approche expérimentale : dans laquelle on recherche empiriquement la compacité maximale pour une mesure directe de la masse d'un volume du béton mis en place par des moyens divers.

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours, à rechercher conjointement deux qualités : résistance et ouvrabilité tenant compte des considérations de coût. De plus il convient souvent de rechercher d'autres qualités : étanchéité, résistance au gel, résistance à l'usure, adaptation à la structure de l'ouvrage (massif, léger, mince, peu ou très ferrailles), mode de transport et technique de mise en œuvre.

I.8. DOMAINE D'UTILISATION DES BETONS DE SABLE

L'utilisation actuelle du béton de sable tient d'avantage à ses propriétés spécifiques par rapport au béton classique. Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable sont les suivants [1]:

- travaux avec du béton injecté.
- travaux avec un fort cadrage.
- pilots de béton armé coulé sur place.
- certains travaux de fondations pour les constructions.
- travaux pour terrasses.
- tuyaux de canalisation en béton simple ou armé.
- panneaux préfabriqués pour murs intérieurs et extérieurs portants, ect....

I.9. LES TECHNIQUES UTILISEES POUR AMELIORER LES PROPRIETES DES BETONS DE SABLE

Les bétons de sable qui ont fait l'objet de plusieurs études sont très utilisées malgré leurs inconvénients telle que la grande teneur en grains fins qui donne une grande surface spécifique ce qui conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable. Ceci entraîne l'augmentation du dosage en ciment (non économique) qui dégage beaucoup plus de chaleur d'hydratation et cause des dégâts aux ouvrages massifs.

En outre, les grains très fins du sable peuvent abaisser l'activité du ciment, ce qui diminue sensiblement la résistance mécanique du béton. D'autre part à cause de la grande surface spécifique du ciment, l'absorption capillaire augmente, ce qui diminue l'imperméabilité du béton durci et augmente le retrait.

Néanmoins, plusieurs recherches ont été réalisées afin d'éliminer les inconvénients du béton de sable pour lui assurer sa valeur économique surtout dans les régions riches en sable comme le sud Algérien.

Le but principal de ces recherches est d'avoir une maniabilité correcte et d'atteindre une bonne résistance mécanique en visant plusieurs solutions :

I.9.1. Amélioration par correction granulaire

Le rôle des granulats dans le comportement mécanique des bétons est une question débattue depuis fort longtemps. Les travaux menés dans le cadre du Projet National Français SABLOCRETE [1], ont montré que le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable. En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste la

même. L'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement certaines caractéristiques (fluage, retrait, résistance, maniabilité).

Plusieurs études consistant à élargir le champ d'utilisation de sable et son apport dans les propriétés mécaniques dans la composition de béton de sable. La substitution d'une partie de sable par une quantité de gravier augmente la résistance, quatre taux de gravillons ont été utilisés pour le renforcement des bétons de sable (0%-0.15%-0.25%-0.35%). Ces pourcentages sont donnés en volume total du béton de sable. Il a été constaté une augmentation de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation des dosages des granulats. Cette augmentation due à la qualité et la forme des granulats concassés utilisés qui donne une meilleure adhérence matrice-granulats. Le diamètre des granulats n'affecte pas directement la résistance [22].

Jaradat et al.[23], ont mené une étude sur la capacité d'utiliser le sable concassé issu des déchets de carrière comme substitut du sable de rivière dans le béton de sable ; les résultats obtenus ont montré une bonne amélioration globale sur les propriétés mécaniques et physiques du béton de sable.

Récemment, Ammari et al.[24], ont amélioré les propriétés physico-mécaniques du béton de sable et développé un béton structural économique en : premièrement, l'exploitation de matériaux locaux comme le sable de dune, le sable de rivière et le filler calcaire pour répondre à la demande croissante de matériaux de construction . Et d'autre part par la réutilisation des déchets de verre, sous forme de poudre (GP), pour résoudre le problème environnemental.

I.9.2. Amélioration par des ajouts cimentaires

Plusieurs études ont porté sur l'incorporation de matériaux d'addition cimentaire dans le béton de sable afin d'améliorer ses propriétés, notamment la résistance à la compression. Parmi celles-ci, l'étude d'Achoura et al [25], dans laquelle l'ajout de fumée de silice ou de laitier granulaire dans le béton de sable a permis une augmentation de 50% de la résistance à la compression. De plus, les observations microscopiques ont montré la cohésion de la microstructure des échantillons, et l'effet pouzzolanique était plus homogène. Cela a permis une amélioration à long terme de la résistance à la compression et surtout de la durabilité.

Dans autre étude les recherches proposent à chaque fois de remplacer une quantité de sable par le filler de déchet de polissage de carrelage de manière à garder le dosage en ciment constant et égal à 350kg/m^3 . Le dosage en eau est alors corrigé de manière à avoir toujours un

rapport $E/C=0.7$. La résistance à la compression pour le béton témoin est égale à 12.5 MPa et pour la durabilité 15.3Mpa. Une bonne résistance à la compression égale à 31MPa pour un dosage de déchet égal à 260 kg/m^3 est enregistrée. Le dépassement de ce dosage cause une chute de la résistance car le surdosage de filler provoque la manifestation des pores. Un effet positif sur la durabilité est aussi noté. La capacité d'absorption d'eau est faible pour un dosage en filler égal à 260 kg/m^3 .

Gadri et al.[26], ont amélioré les propriétés physico-mécaniques du béton de sable par ajout de filler de déchet de polissage carrelage comme filler. Ce recyclage de ce déchet permet son exploitation industrielle ainsi que la protection de l'environnement. Les recherches proposent à chaque fois de remplacer une quantité de sable par le filler de déchet de polissage de carrelage de manière à garder le dosage en ciment constant et égal à 350kg/m^3 . Le dosage en eau est alors corrigé de manière à avoir toujours un rapport $E/C=0.7$.

I.9.3. Amélioration par compactage

Pour compenser l'absence des gros granulats et diminuer le volume des vides et le dosage en eau a proposé de réaliser un compactage dynamique afin d'améliorer les performances mécaniques du béton de sable. Cette étude vise à étudier la possibilité d'exploitation des matériaux locaux dans le corps des chaussées au lieu d'utiliser des matériaux qui exigent un traitement ou un approvisionnement très coûteux. L'utilisation d'une combinaison de sables ternaire dans la formulation d'un Béton de sable compacte au rouleau (CSCR), pourrait offrir beaucoup de solutions aux réseaux de transports et d'infrastructures.

Le béton de sable compacté aux rouleaux est considéré comme une technologie évolutive, ce matériau est défini comme étant un mélange, raide à affaissement nul, de sable, de ciment et d'eau (éventuellement avec ajouts cimentaires) qui est compacté en place en utilisant un matériel spécifique comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou un matériel couramment utilisé en travaux publics tel que les rouleaux compacteurs. A l'état frais, le CSCR se comporte comme un sol légèrement humide mais, en passant à l'état durci, il se comporte comme un béton.

La recherche sur Le béton de sable compacté (BSC) a été commencée en Sénégal au cours de l'année 1996 ou I. K. Cisse a prouvé l'intérêt technico-économique des bétons de sable compacté selon une étude comparative entre le béton de sable compacté et les chaussées souples [27]. De manière générale, il a trouvé que les bétons de sable routiers coûtent moins cher que les matériaux hydrocarbonés. En 1995 le chercheur tunisien J. Neji a présenté une étude sur la

valorisation du sable saharien dans la technologie routière, puis il a proposé le béton de sable compacté comme un nouveau matériau pour les fondations béton pendant l'année 2006 [28]. D'autre chercheur comme S.khay et B. Othmen en fait des études approfondies sur les propriétés mécaniques du béton de sable, Ils ont été particulièrement intéressés au sable de concassage et au sable de dune saharienne qui a donné des résultats encourageants. Le même groupe de recherche nous offre un article concernant l'influence des fibres polypropylène sur les fissures du BSC [29].



Figure I. 8. *Béton de sable compactant au roulant*

I.9.4. Amélioration par ajout de fibres

Les fibres sont destinées à réduire les conséquences du retrait au premier âge et d'améliorer la résistance à la traction du béton. Leurs répartitions, orientations et longueurs jouent un rôle déterminant sur les résistances mécaniques. Les fibres organiques sont plus utilisées pour faire face aux effets de retrait de prise et éviter les fissurations qui en résultent. Par contre, pour améliorer la ductilité, on peut utiliser des fibres d'acier ou de fonte amorphe[1].

Le béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe permet d'obtenir des performances mécaniques très intéressantes, y compris à court terme, de sorte que le décoffrage au jeune âge des éléments préfabriqués peut s'effectuer sans problème [7].

Sur le plan résistance mécanique, Felekoğlu et al. [30] ont montré dans une étude sur l'effet de l'incorporation des fibres organiques dans les micro-bétons, que l'introduction des fibres polypropylènes (à un dosage de 0.5% volumique) améliore la résistance à la flexion, mesurées sur des éprouvettes 4x4x16 cm.

L'inconvénient de l'utilisation des fibres dans les bétons reste toujours l'obtention d'une mauvaise maniabilité, notamment dans le cas des bétons fluides. A l'heure actuelle, ce problème est partiellement résolu par l'utilisation des adjuvants superplastifiants [7].

De plus, afin d'augmenter la ductilité et la résistance du béton contre les charges de flexion et de compression, Orouji et al.[31] ont utilisé de la poudre de verre, des fibres de polypropylène. La mise en œuvre de fibres de polypropylène a permis de réduire les problèmes liés à la fragilité du béton, GP a également contribué à la démarche de durabilité environnementale.

Plus récemment, Hadjoudja et al.[32] ont présenté les résultats d'essais sur le comportement à la fissuration de bétons de sable de dune contenant des additions minérales de fumée de silice, de fillers calcaires et de fibres métalliques, il a constaté que la fumée de silice et le filler calcaire augmentent significativement l'âge de la fissuration du béton de sable.

I.9.5. Amélioration par l'addition (ajout cimentaire + superplastifiant+ diminution E/L)

Plusieurs propriétés spécifiques du béton de sable le rendent privilégié pour certaines utilisations. Les performances mécaniques du béton de sable sont inférieures à celles du béton normal en général et la résistance à la compression à 28 jours reste un facteur limitant notamment, la cinétique de montée en résistance est généralement plus lente pour le béton de sable, cela peut supprimer son utilisation comme un -fixer le béton. Cela est dû à la grande quantité d'eau utilisée dans le mélange, à la quantité de petits éléments, ainsi qu'au grand nombre de pores fins dans la structure de durcissement du béton de sable. Cependant, le béton de sable peut être très performant, avec une résistance très élevée (jusqu'à 90 MPa) notamment avec l'avènement des superplastifiants et le développement de la technologie des matériaux aujourd'hui [1], [33].

Le béton de sable à haute performance (BSHP) contient exactement les mêmes ingrédients que le béton de sable. Son composé principal est du sable à granulométrie continue là où le sable de rivière est préféré, avec du ciment portland de haute résistance initiale, et de la fumée de silice dans un rapport compris entre 5 à 25% de la masse totale du liant et parfois d'autres additifs minéraux comme mouche cendres ou scories de fours à roche broyée et granularité. Ceci est destiné à améliorer la résistance mécanique, la compacité et la maniabilité. Un super plastifiant peut également être ajouté pour réduire l'eau de (1.5%), permettant d'atteindre un ratio eau sur ciment (E/C) aussi bas que 0.35 [34], [35]. Il est relativement aisé de formuler des sables-bétons à hautes performances avec une résistance à la compression CS > 50 ou 60 MPa, tout en matériaux courants, à doses normales et sans adjonction de matériaux très fins[1].

D'autres ont étudié l'effet combiné de la fumée de silice et du laitier granulaire avec la formulation de béton à haute performance (HPC). La méthode de traitement consistait à utiliser l'eau de gypse comme milieu agressif pour les échantillons de béton. Les résultats ont montré que le béton contenant 5% de fumée de silice et 10% de laitier granulaire offrait de meilleures propriétés physiques et mécaniques que le béton sans additifs. Les résultats de la diffraction des rayons X (XRD) ont également indiqué que le pic de Ca(OH)_2 présentait une densité élevée dans le béton sans additif et disparaissait complètement avec la présence de fumée de silice et de laitier. De plus, l'intensité maximale de C_4AH_{13} a été fortement enregistrée avec la fumée de silice et le laitier granulaire [36].

Behim et al. [37] ont également affirmé dans leurs recherches que la taille de cristallisation et la granulométrie du laitier jouent un rôle important dans le développement potentiel de la résistance mécanique du mortier, car le broyage a deux facteurs : le lissé et aussi la stimulation de surface par la création de défauts. Cependant, l'inconvénient serait son coût élevé. De plus, la température améliore la cinétique de la réaction comme dans la plupart des réactions chimiques.

Plusieurs travaux ont utilisé l'approche de conception de mélange. Certains d'entre eux l'ont appliqué sur des propriétés de béton à haute performance (BHP), dans lesquelles le ciment a été partiellement remplacé par deux types d'additifs minéraux, les silicates (dunes de sable fin (SF) et le calcaire (concassage total des déchets (LF))[38]. Un autre auteur a utilisé la même technique avec deux ajouts minéraux (pouzzolane naturelle et filler calcaire (LF))[39]. Attia et al [40] ont également utilisé la même méthode pour améliorer les propriétés du béton où les effets du sable de rivière (RS), du sable de dune (DS) et du sable pulvérisé (CS) sur la maniabilité, la force de compression et de flexion du béton ont été étudiés.

Dans une étude précédente, les résultats obtenus par Zahrai et al.,[41] montrent que l'application des additifs AP2RC et P1RB micro-silice a fourni une bonne maniabilité pendant la construction et augmenté les valeurs de résistance à la traction, à la compression et à la flexion du béton pendant les premiers âges, ainsi qu'une réduction de la porosité diminuant la perméabilité. Les effets simultanés des granulats de béton recyclés (RCA) et des fibres de polypropylène (PPF) sur la maniabilité du béton autoplaçant (SCC) ont été étudiés par Matar et Assaad, [42], les résultats montrent que les inclusions de PPF nécessitent une demande plus élevée de HRWR pour sécuriser débit d'affaissement fixe, en particulier lorsque les mélanges sont préparés avec des niveaux de remplacement de RCA accrus. En outre, les mélanges

contenant des ajouts accrus de PPF et de RCA ont conduit à une meilleure résistance à la ségrégation.

I.10. DURABILITE DES BETONS DE SABLE

La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend évidemment de l'environnement de celui-ci (milieu urbain, marin, montagnoux, etc). L'estimation de la durabilité se fera par conséquent à l'aide d'essais de perméabilité à l'eau et à l'air, de mesure de la carbonatation et de la pénétration des ions de chlorures. Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico- chimiques [43]:

- La perméabilité à l'eau est plus faible que celle du béton traditionnel (2.5×10^{-12} m/s contre 1×10^{-10} m/s), à condition que le dosage en fines (ciment et fillers) soit optimal ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés.
- La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores ($< 10 \mu\text{m}$) et de l'importance de l'absorption initiale. En effet, la dimension moyenne des pores du béton de sable classique (300μ) favorise l'absorption. Des résultats expérimentaux du Balayssac et al [44] laissent apparaître une quasi-proportionnalité entre la profondeur carbonatée et l'absorption initiale. Mais la carbonation ne présente pas de danger pour le béton non armé et pour les zones suffisamment éloignées des armatures puisqu'elle a tendance à boucher les pores par formation de CaCO_3 . Aussi, si la cure à l'eau est bien faite, elle favorise l'hydratation qui a tendance à colmater les capillaires existants. La prolongation de la cure à l'eau de 3 à 28 jours a pour effet de diviser l'absorption initiale par deux [11].
- Le comportement à la pénétration des ions chlore, que ce soit en milieu marin ou par le biais d'essais accélérés d'immersion-séchage, est comparable à celui des bétons traditionnels. Par ailleurs, le temps de dépassivation traduisant la pénétration des ions chlore et le risque de corrosion d'éventuelles armatures est similaire à celui des bétons traditionnels de compacité comparable et utilisant un ciment identique. Cependant, du fait que la diffusion des ions chlore peut se faire par des canaux très fins et dans le cas de béton de sable armé, il y a lieu de renforcer l'effet de colmatage dû aux fines d'addition et au ciment, par l'emploi d'ultra-fines [11].

Finalement 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 à Paris, etc. [1].

I.11. CONCLUSION

La synthèse des études et recherches les plus intéressantes qui ont été réalisées sur l'utilisation des bétons de sable dans le sud algérien fait apparaître que le béton de sable peut constituer une solution économique intéressante dans plusieurs domaines de la construction dans diverses régions. Ce matériau permet d'obtenir des performances mécaniques acceptables. La vulgarisation des bétons de sable et de leurs constituants s'inscrit dans le cadre de la promotion et de la valorisation des ressources locales abondantes (sable) et du développement de techniques innovantes.

CHAPITRE II

PLANS D'EXPERIENCE ET METHODES DE FORMULATION DES BETONS DE SABLE

CHAPITRE II

PLANS D'EXPERIENCE ET METHODES DE FORMULATION DES BETONS DE SABLE

II.1. INTRODUCTION

La formulation d'un béton consiste de choisir des constituants et les proportionner en vue d'obtention des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques. [45]

Ce chapitre est scindé en deux parties, la première partie consiste à exposer l'approche des plans de mélange et les notions statistiques appliquées dans ce type de plans d'expérience avec quelques exemples d'applications. Et la deuxième partie va porter sur quelques approches de formulation des bétons de sable, une approche théorique basée sur l'optimisation de la compacité de squelette granulaire, et l'approche expérimentale basées sur la réalisation de gâchées successives.

II.2. METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE

II.2.1. Définition

La méthode des plans d'expérience permet d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche sur le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt Y et des variables indépendantes X_i est à partir la fonction $y=f(X_i)$.

Avec cette méthode on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Et d'identifier les facteurs les plus influents et les interactions éventuelles entre les facteurs.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. Il existe plusieurs types des plans d'expérience, Dans notre étude nous avons utilisés le plan de mélange. [46]

II.2.2. Approche du Plan de mélange

Dans les plans d'expériences classiques (plans factoriels, plans pour surfaces de réponse) les facteurs sont indépendants, cela signifie que l'on peut choisir en toute liberté le niveau d'un facteur quels que soient les niveaux déjà attribués aux autres facteurs ; Cette liberté n'existe pas lorsque l'on étudie des mélanges car, en général, on étudie les réponses en fonction des proportions des constituants du mélange. Dans ce cas les facteurs d'étude sont les proportions des constituants du mélange. Comme la somme de ces proportions est toujours égale à 100 %.

La non-indépendance des facteurs est exprimée par la contrainte fondamentale des mélanges [46].

II.2.3. Contrainte fondamentale des mélanges

Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants.

Soit un mélange ayant n constituants, chaque constituant participe pour une certaine part au mélange total. Mais l'ensemble des constituants du mélange forme un tout et la somme de leurs teneurs est égale à 100 %. Lorsque l'on a défini les proportions des $n - 1$ premiers constituants, la proportion du dernier ne peut plus être choisie, elle est déjà déterminée [46].

Si l'on note x_i la teneur en constituant i , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait à la relation :

$$\sum_{i=1}^n x_i = 100\% \quad (2.1)$$

La teneur de chaque constituant reste comprise entre 0 et 100 %. Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité (variables codées), on écrira :

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (2.2)$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges. Les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes des représentations utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

II.2.4. Représentation géométrique des mélanges

On peut représenter les mélanges binaires sur un segment de droite (**Figure II. 1**). Le produit A est à droite et le produit B est à gauche. La graduation inférieure est celle du produit A. Elle varie de 0 à gauche à 1 à droite. La graduation supérieure est celle du produit B. Elle varie de 0 à droite à 1 à gauche. La somme des teneurs, en un point de l'échelle, est égale à l'unité [46].

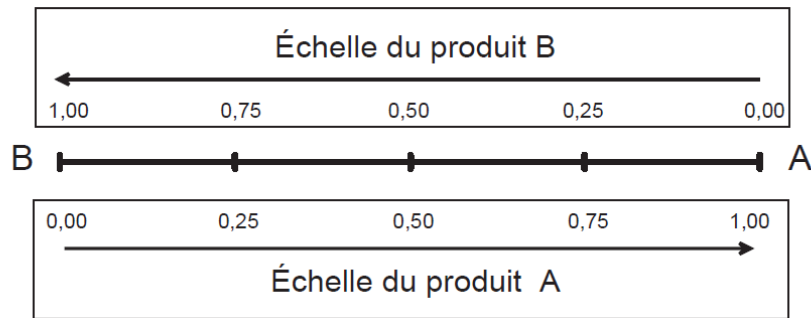


Figure II. 1. Présentations des mélanges à deux constituants sur un segment de droite [46]

Les mélanges ternaires peuvent être représentés à l'aide d'un triangle équilatéral. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral (**Figure II. 2**). Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle (le côté gauche AB du triangle représente les compositions des mélanges des seuls produits A et B ; et ces mélanges ne contiennent pas de produit C). Chaque côté du triangle équilatéral est gradué de 0 à 1. On n'a laissé que l'échelle d'un seul produit sur chaque côté. L'échelle de l'autre produit se déduit par complément à 1. Le côté AB est gradué pour le produit A : 1 est au point A et 0 au point B. Un point de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle [46].

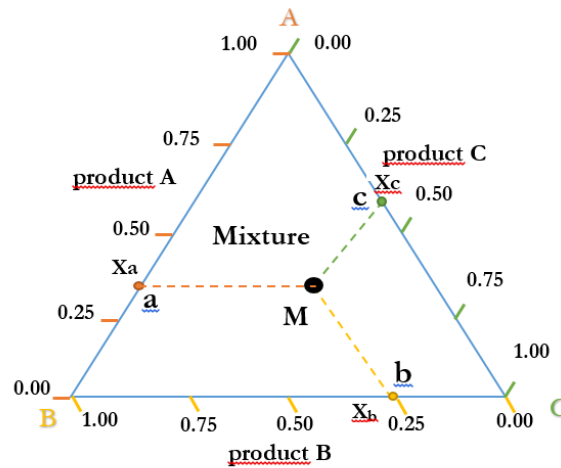


Figure II. 2. Présentations des mélanges à trois constituants [46]

Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent le respect de la contrainte fondamentale des mélanges :

$$M_a + M_b + M_c = A_c + B_a + C_b = AB = AC = BC = 1. \quad (2.3)$$

La représentation des mélanges à quatre constituants est un tétraèdre régulier. On obtient les compositions d'un mélange en projetant le point représentatif du mélange sur les faces et sur les côtés du tétraèdre (**Figure II. 3**).

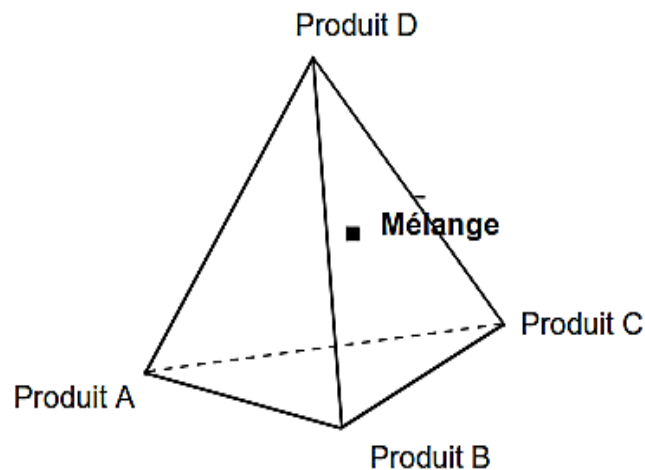


Figure II. 3. Présentations des mélanges à quatre constituants par un tétraèdre régulier [46]

Il existe plusieurs types des mélanges selon l'emplacement des points représentatifs des compositions. On distingue :

II.2.4.1. Plans de mélange en réseaux

Les plans en réseaux (*Simplex lattice designs*). Sont les premiers plans de mélanges qui ont été introduits Pour les mélanges à trois constituants, le plus simple des plans de mélanges en réseaux ne contient que les trois produits purs. Les points représentatifs de ces produits sont aux sommets du triangle équilatéral (Figure II. 4). Les coordonnées de ces points sont 0 et 1.

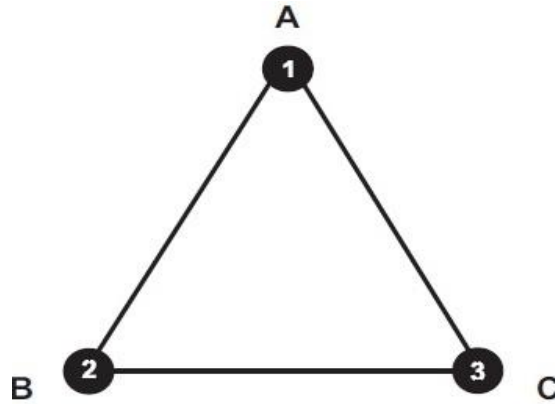


Figure II. 4. Plan de mélange ne comportant que les trois produits purs [46]

Le plan qui ne fait intervenir que les produits purs peut être enrichi par les points de composition moyenne, c'est-à-dire par les mélanges contenant 50 % de chacun des produits (Figure II. 5). Ces points de composition moyenne se situent au milieu des côtés du triangle. Leurs coordonnées sont 0 et $\frac{1}{2}$ [46].

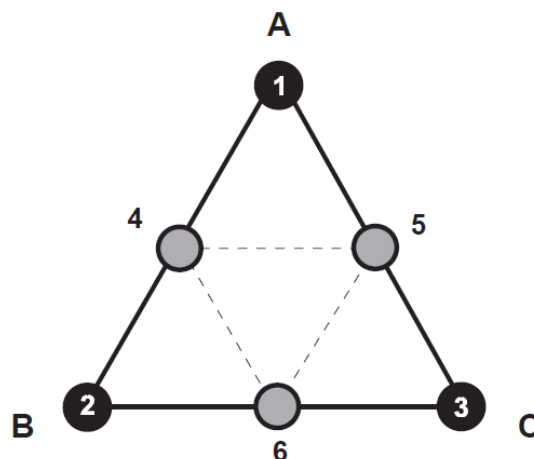


Figure II. 5. Plan de mélanges en réseaux (*Simplex lattice designs*) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié. Ce plan est noté $\{3,2\}$ [46]

Si l'on désire un réseau de points plus serré (**Figure II. 6**), il faut diviser la longueur des côtés par m . Le pas du réseau est de $1/m$ et les coordonnées des points expérimentaux sont $0, 1/m, 2/m, 3/m$ jusqu'à $m/m = 1$. Ces plans sont nommés $\{q, m\}$: q est le nombre des constituants et m est le pas de réseau. Ici, le plan de la **Figure II. 6** est un plan $\{3, 2\}$, soit 3 constituants et un pas de $1/2$. Cette notation permet de calculer très rapidement le nombre de compositions à préparer et à étudier connaissant le nombre de constituants du mélange et le nombre m . Pour un plan $\{q, m\}$, le nombre total de compositions différentes est égal à :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \quad (2.4)$$

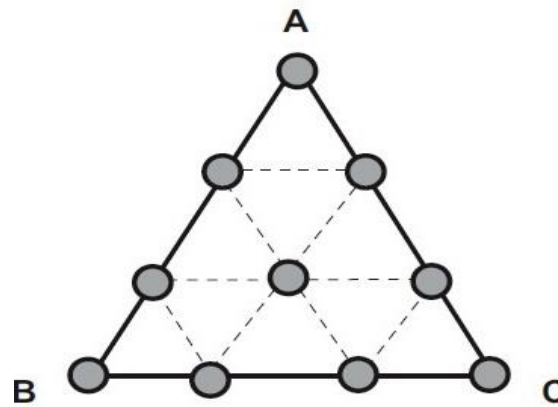


Figure II. 6. Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges $1/3, 2/3$ et $1/3, 1/3, 1/3$ ce plan est noté $\{3,3\}$ [46]

II.2.4.2. Plans de mélange centrés

Les plans de mélanges centrés (Simplex-centroid designs) se distinguent des plans en réseaux par la présence systématique d'un point central, c'est-à-dire d'une composition contenant autant de chacun des constituants du mélange (**Figure II. 7**). Le nombre N des compositions à étudier pour un plan de mélange centré à q constituants est donné par la formule :

$$N = 2^q - 1 \quad (2.5)$$

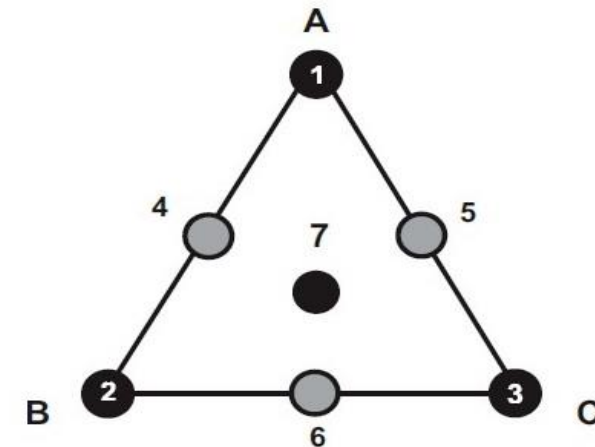


Figure II. 7. Plan de mélange centré (Simplex-centroid designs) [46]

II.2.4.3. Plans de mélange centrés augmentés

Les plans de mélanges centrés augmentés (Augmented Simplex-centroid) sont des plans de mélanges centrés auxquels on ajoute les centres de gravité des simplex unitaires (Figure II. 8).

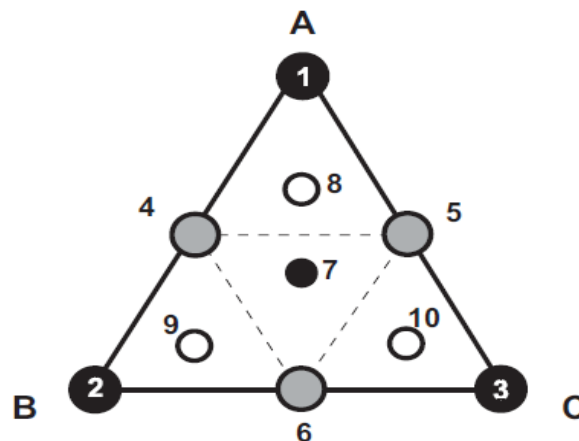


Figure II. 8. Plan de mélange centré augmenté (Augmented Simplex-centroid) [46]

II.2.5. Modèles mathématiques des plans de mélanges

Le modèle mathématique appliqué aux plans de mélanges prend en compte la contrainte fondamentale des mélanges. Pour cette raison, les plans de mélange de trois constituants sont représentés par un modèle cubique restreint au lieu un modèle cubique complet, qui ne comprend que les termes du premier degré, les termes rectangles et le produit des trois constituants :

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.6)$$

II.2.6. Système d'équations

Dans un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$y = X a + e \quad (2.7)$$

Où.

y : est le vecteur des réponses.

X : est la matrice de calcul des coefficients ou matrice du modèle qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

a : est le vecteur des coefficients.

e : est le vecteur des écarts.

Ce système ne peut pas, en général, être résolu simplement car le nombre d'équations est inférieur au nombre d'inconnues. En effet, il y a n équations et $p + n$ inconnues. Cette résolution ne peut être menée à bien que si l'on utilise une méthode de régression. La plupart du temps cette méthode est basée sur le critère d'optimisation des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note :

$$\hat{a} = (X'X)^{-1} X' y \quad (2.8)$$

La formule dans laquelle la matrice X' est la matrice transposée de X . Il existe de nombreux logiciels qui exécutent ce calcul et qui donnent directement les valeurs des coefficients [46].

Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- ☒ La matrice d'information $X' X$,
- ☒ La matrice de dispersion $(X' X)^{-1}$.

II.2.7. Notions de statistiques

Pour mener à bien cette étude, il faut connaître les bases statistiques qui sont appliquées aux plans d'expérience pour faire les calculs et appliquer les raisonnements corrects. Les logiciels nous soulagent de toute la partie calcul, mais il faut être capable d'interpréter les grandeurs statistiques qu'ils nous fournissent.

II.2.7.1. Erreur expérimentale

En général, on prend la moyenne arithmétique comme valeur centrale et l'écart-type comme mesure de la dispersion [47].

II.2.7.2. Moyenne

La moyenne arithmétique \bar{y} est la somme des valeurs divisée par le nombre de valeurs, elle est donnée par la relation :

$$\bar{y} = (1/n) \sum_1^n (y_i) \quad (2.9)$$

II.2.7.3. Variance

La variance est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon. Elle est définie par la somme des carrés des n écarts à la moyenne divisé par n-1 (le degré de liberté des écarts à la moyenne) [47].

$$V = (1/n) \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

II.2.7.4. Ecart type

L'écart-type sert à mesurer la dispersion, ou l'étalement, d'un ensemble de valeurs d'un échantillon statistique autour de leur moyenne. Il est défini comme la racine carrée de la variance v :

$$S = \sqrt{V} = \sqrt{(1/n) \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.11)$$

II.2.7.5. Intervalle de confiance des réponses

Un intervalle de confiance encadre une valeur réelle que l'on cherche à estimer à l'aide de mesures prises par un procédé aléatoire. En particulier, cette notion permet de définir une marge d'erreur entre les résultats [47].

$$\rho = \sqrt{(1/(n-1) \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2)} \quad (2.12)$$

II.2.7.6. Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire simple. Le R^2 est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) à la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne), il est déterminé par la relation suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.13)$$

Avec :

y_i : La valeur de la mesure, \bar{y}_i la valeur prédite correspondante et \bar{y} la moyenne des mesures.

Si le R^2 est de 1, alors la régression détermine 100% de la distribution des points. En pratique, il est impossible d'obtenir un R^2 de 1 à partir de données empiriques. On considère qu'un R carré est élevé lorsqu'ils se situe entre 0.85 et 1.

II.2.7.7. Résidus

C'est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée.

II.2.7.8. P-value

La P-value est la probabilité pour un modèle statistique donné sous l'hypothèse nulle d'obtenir la même valeur ou une valeur encore plus extrême que celle observée.

II.3. EXEMPLES D'APPLICATIONS DE PLANS DE MELANGES

Dans le passé, les chercheurs menaient des expériences en séquence, modifiant les paramètres un par un. Cette méthode donne des résultats, mais elle prend du temps et nécessite la réalisation d'un grand nombre d'expériences. Les méthodes d'analyse de données vous permettent de collecter, résumer et présenter des données afin d'extraire le maximum d'informations pour des expériences ultérieures. Les plans d'expériences, en particulier les plans de mélanges, est utilisées pour mener à bien des études expérimentales planifiées. Cette approche aide les expérimentateurs à organiser leurs études différemment, à tester leurs hypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à résoudre des problèmes[48].

Plusieurs travaux ont utilisé l'approche de plan de mélange. Certains d'entre eux l'ont appliqué sur des propriétés de béton à haute performance (BHP), dans lesquelles le ciment a

été partiellement remplacé par deux types d'additifs minéraux, Sable de dune broyé (SDB) et le calcaire (Fillers calcaires (FC)) [38].

Les résultats trouvés montrent que, globalement, l'introduction de l'addition calcaire (Fillers calcaires (FC)) et de l'addition siliceuse (Sable de dune broyé (SDB)) dans le ciment en substitution jusqu'à 25%, joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il a été montré notamment que la résistance mécanique augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (5% de SDB et 5% de FC) puis diminue pour des pourcentages plus élevés (Figure II. 9). Les résultats trouvés montrent aussi qu'il est possible d'obtenir des bétons à hautes performances de bonne ouvrabilité grâce à l'ajout des fines calcaires et de fines siliceuses. À l'issue des résultats obtenus, ils ont constaté l'intérêt de modéliser la réponse étudiée par un polynôme qui est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire toutes les expériences.

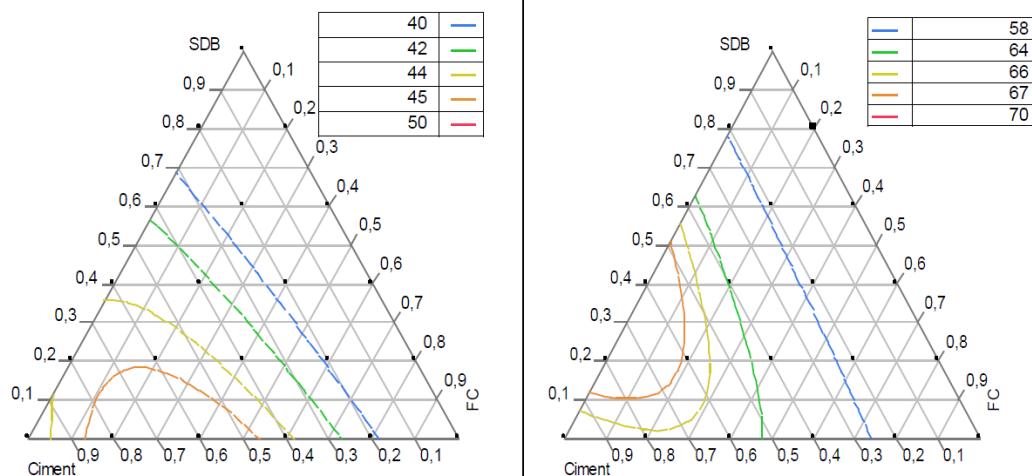


Figure II. 9. Les courbes iso-réponses de la résistance mécanique à 7 jours et à 28 jours [38]

L'objectif de l'étude de Hadji et al[39], est l'évaluation de l'effet de l'addition de la pouzzolane naturelle (PF) et du calcaire (LF) broyés sur les propriétés physico-mécaniques des bétons à hautes performances. À partir un plan de mélange de 3 facteurs et 5 niveaux, la variation statistique des résultats des caractéristiques physico-mécaniques est modélisée par des modèles mathématiques, par l'utilisation de logiciel JMP7. Les tests statistiques des modèles mathématiques développés montrent qu'ils sont statistiquement significatifs avec des coefficients de détermination $R^2 \geq 0.82$. Les résultats trouvés ont montré qu'il ya un effet complémentaire entre les deux ajouts et le BHP14 (10% LF + 5% PF) offre un bon compromis entre la résistance mécanique et la maniabilité.

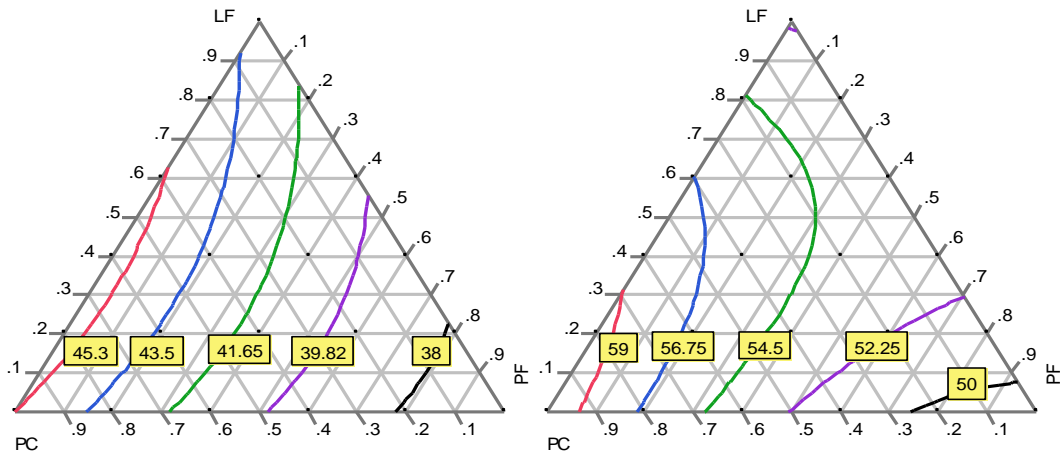


Figure II. 10. Courbes iso réponses de Cs7 et Cs28 [39]

Attia et al ont également utilisé la même méthode pour améliorer les propriétés du béton où les effets du sable de rivière (RS), sable de dune (DS) et sable pulvérisé (CS) sur la maniabilité, la compression et la résistance à la flexion du béton a été étudiée. Les résultats obtenus ont prouvé que le béton, à base de mélange binaire C15, présente la résistance maximale à la compression (MCS) à 28 jours avec une amélioration d'environ 20%, par rapport au béton de référence (C21). Pour les mélanges ternaires, le MCS à 28 jours a été obtenu pour le mélange C10 avec une amélioration d'environ 15% par rapport à C21. L'augmentation de la résistance à la compression au cours des réactions d'hydratation s'est accompagnée d'une augmentation de la résistance à la flexion, mais dans des proportions différentes. L'incorporation partielle de DS (= 40%) dans la formulation du béton peut apporter une solution pour certains travaux dans les régions du sud du pays. De plus, le CS est une source alternative intéressante pour remplacer 60% du RS.

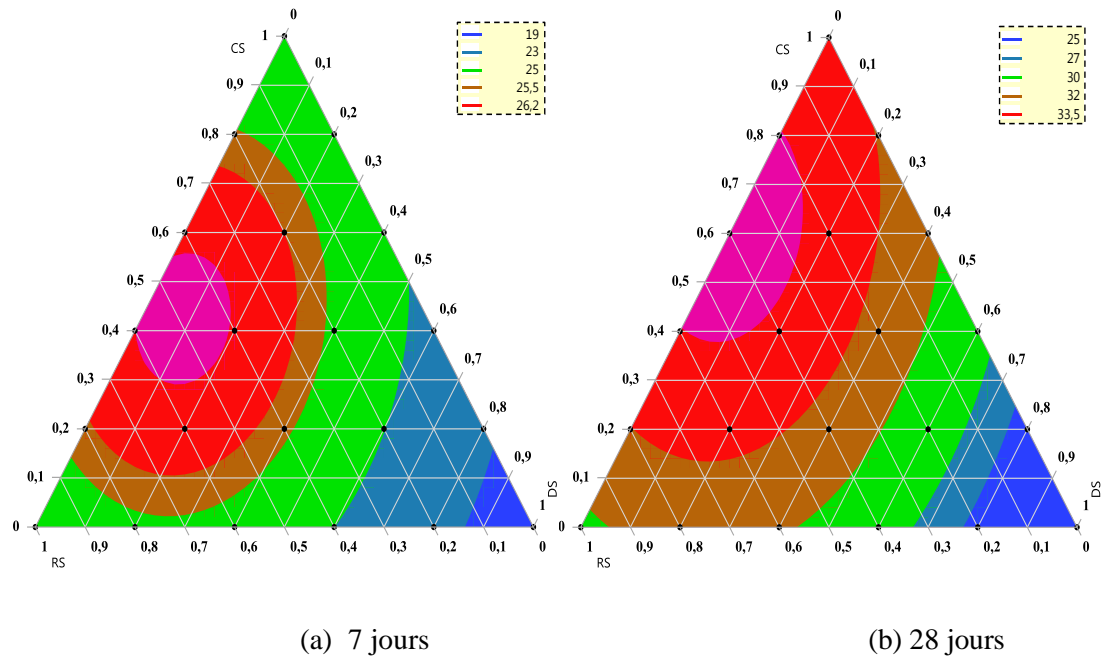


Figure II. 11 .La courbe iso réponse de la résistance à la compression (Mpa) en fonction des proportions SR, SC et SD [40]

II.4. APPROCHES DE LA FORMULATION DU BETON DE SABLE

II.4.1. Approche de B.COURET en 1982 [49]

L'objectif de son travail est de formuler un béton de sable à usage routier. Il adopte comme formulation de base la composition d'un mortier ISO (0.5 part (en poids) d'eau, une part de ciment et trois parts de sable normal.) dosé à 450 Kg/m^3 . (**Tableau II. 1**).

Tableau II. 1. Formulation de B.couret

a) Mortier ISO :		b) Béton de sable :	
- Ciment CPJ 45	450 Kg/m^3	- Ciment CPJ 45	450 Kg/m^3
- Sable normal	1350 Kg/m^3	- Sable alluvionnaire	1350 Kg/m^3
- Eau	225 Litres/ m^3	- Eau	225 Litres/ m^3

Le **Tableau II. 2** illustre les résultats trouvés de la résistance de flexion et de compression par des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm, pour les deux formulations.

Tableau II. 2. Résistances comparatives entre le mortier iso et le béton de sable

	Mortier ISO	Béton de sable
Flexion (MPa)	2 jours	3.6
	7 jours	5.6
	28 jours	8.0
Compression (MPa)	2 jours	17.5
	7 jours	33.3
	28 jours	50.6

Après cela, B.COURET fait la formulation avec filler où il a réduit et fixé le dosage en ciment à 330 Kg/m³ (Dosage courant dans la construction routière). Il a utilisé pour son béton plusieurs types de sables (sable de dunes, sable de rivière, sable de carrière...) et de fillers, à granulométrie et nature différentes.

Après une série très longue d'essais, effectuée par tâtonnement, B.Couret a adopté la composition finale ci-dessous (**Tableau II. 3**) :

Tableau II. 3. Formulation et performances obtenu par l'approche de B.couret

Formulation		Performances obtenues
Ciment CPJ 45	330 Kg/m ³	- Résistance à la compression à
Sable alluvionnaire	1300 Kg/m ³	28 jours = 22 MPa
Filler (0/200 microns)	130 Kg/m ³	- Résistance à la flexion à 28
Plastifiant	1.65 Kg/m ³	jours = 5.1 MPa.
Entraîneur d'air	0.66 Kg/m ³	-Temps d'écoulement au
Eau courante	215 litres/m ³	maniabilimètre (LCL) = 6.5
		secondes

II.4.2. Approche de P.DELUDE en 1984 [50]

L'objectif, que s'est fixé par P.DELUDE pour la formulation de son béton était la recherche d'un squelette granulaire optimal. Comme procédure de formulation, il déterminait par approximations successives l'ensemble des proportions relatives des constituants solides inertes, pour lesquelles le dosage en ciment et en eau est fixé.

La courbe de la **Figure II. 12** présente la variation du temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier LCL en fonction du rapport $x = F/S$, où :

F : représente la teneur volumique en filler.

S : représente la teneur volumique en sable.

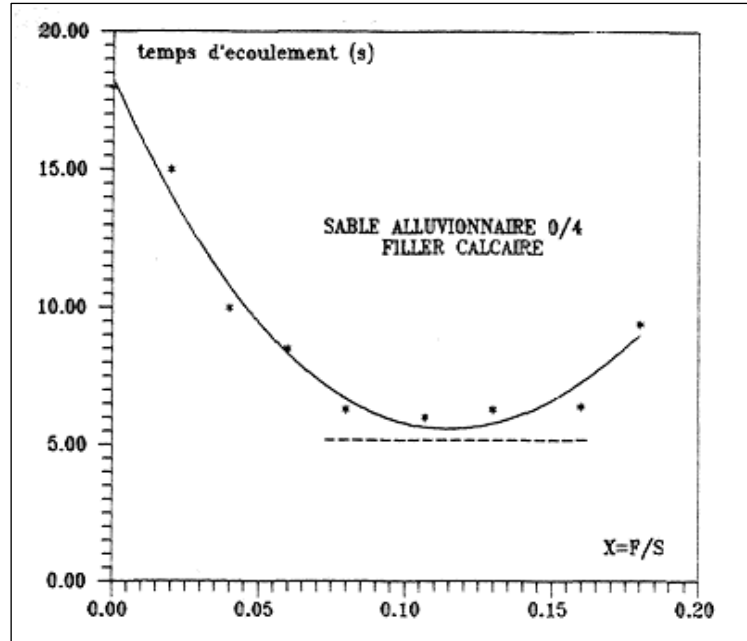


Figure II. 12. Courbe représentative de la variation du temps du temps d'écoulement en fonction du rapport volumétrique F/S [50]

La courbe présente dans la zone de son minimum une partie plus ou moins aplatie. C'est dans cette zone où P.DELUDE a choisi les formules retenues pour des essais complémentaires de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques. Le **Tableau II. 4** présente un exemple de formule retenue :

Tableau II. 4. Formulation et performances obtenue par l'approche de P.DELUDE

Formulation		Performances obtenues
Ciment CPA 55	350 Kg/m ³	- Résistance à la compression à 28 jours = 28.9 MPa
Sable alluvionnaire 0/4	1400 Kg/m ³	
Filler calcaire	160 Kg/m ³	- Résistance à la flexion à 28 jours = 3.4 MPa.
Eau courante	255 Litres/m ³	- Temps d'écoulement = 6 secondes

II.4.3. Approche de GUINEZ, GLUAIS et DELUDE en 1984 [51]

Cette approche est basée sur l'augmentation de la compacité du béton par l'adjonction d'un filler. L'objectif recherché était l'obtention d'une compacité maximale, pour que les caractéristiques physiques et mécaniques soient meilleures. L'étude a été menée sur un sable alluvionnaire 0/3 mm pour être ensuite étendue à d'autres types de sable.

- La première étape consistait à rechercher par tâtonnements un mélange de sable, ciment et eau (formulation de base) possédant une bonne maniabilité et une résistance à la compression voisine de celle des briques et des parpaings (autour de 8 MPa). Cinq formules dosées respectivement de 450, 350, 300, 250 et 200 Kg de ciment au m³ ont été soumises à des essais mécaniques. La formule retenue et les performances obtenues étaient la suivante :

Tableau II. 5. Formulation et performances obtenue par l'approche de GUINEZ et al en 1^{er} étape

Formulation		Performances obtenues
Ciment CPJ 45	300 Kg/m ³	-Résistance à la compression à 28 jours = 8.2 MPa
Sable 0/3	1600 Kg/m ³	
Eau	320 Kg/m ³	-Temps d'écoulement au maniabilimètre = 8 secondes

- La deuxième étape consistait à améliorer les performances de la formulation de base par la recherche de la meilleure correction granulaire possible, avec l'introduction du type de filler qui convient. Pour cela, trois types de fillers (calcaires), différents par leurs granulométries ont été utilisés à divers dosages. Les dosages en ciment et en eau ont été fixés à 300 Kg/m³ et 240 litres /m³ respectivement. Les quantités de sable et de filler sont variables. Les fillers employés avaient les caractéristiques granulométriques suivantes :
 - Filler V : le plus fin, 75% des grains inférieurs à 20 microns.
 - Filler R : 62 % des grains inférieurs à 40 microns.
 - Filler F₃ : 20 % des grains inférieurs à 40 microns et 75 % inférieurs à 200 microns.

Les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques sont obtenus avec la correction par filler le plus fin (**Tableau II. 6**).

Tableau II. 6. Formulation et performances obtenu par l'approche de GUINEZ et al en 2^{ème} étape

Formulation		Performances obtenues
Ciment CPJ 45	300 Kg/m ³	-Résistance à la compression à 28 jours = 20.2 MPa
Sable 0/3	1325 Kg/m ³	
Filler V	130 Kg/m ³	-Temps d'écoulement au maniabilimètre = 10 secondes
Eau	240 litres/m ³	

Dans la troisième étape, la quantité de ciment a été réduite à 250 Kg/m³ et divers adjuvants (plastifiants) ont été utilisés. La formule finale adoptée (pour un sable alluvionnaire 0/3 mm) est la suivante (**Tableau II. 7**) :

Tableau II. 7. Formulation et performances obtenu par l'approche de GUINEZ et al en 3^{ème} étape

Formulation		Performances obtenues
Ciment CPJ 45	250 Kg/m ³	-Résistance à la compression à 28 jours = 17.3 MPa
Sable 0/3	1350 Kg/m ³	
Filler V	130 Kg/m ³	-Temps d'écoulement au maniabilimètre = 7 secondes
Eau	240 litres/m ³	
Plastifiant	0.5 Kg/m ³	

II.4.4. Approche de J.J.CHAUVIN en 1987 [52]

J.J.CHAUVIN est fixé au préalable les dosages en ciment et en eau à 350 kg/m³ et 250 litres/m³ respectivement pour formuler ses bétons de sable, Le dosage en eau a été choisi arbitrairement.

Il a ensuite étudié les relations existantes entre la nature et le dosage en fillers d'un côté, et les principales caractéristiques du béton de l'autre côté (résistance, compacité et maniabilité).

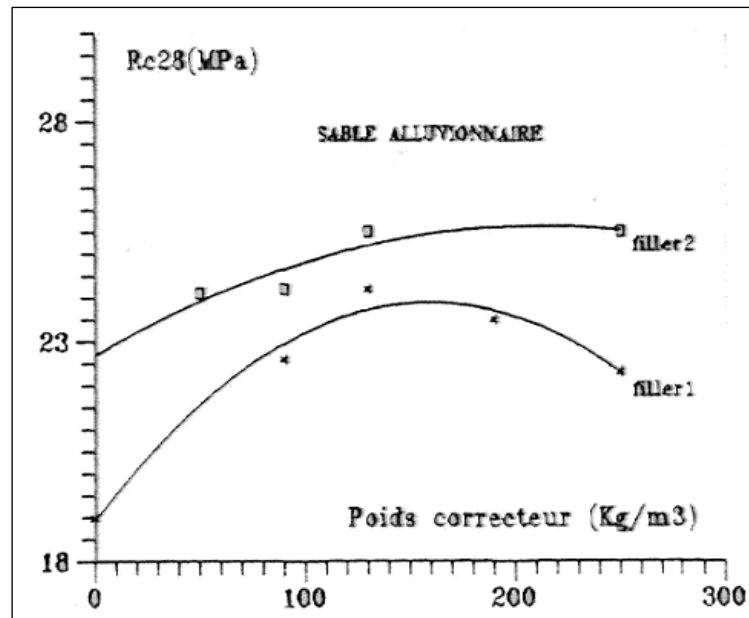


Figure II. 13. Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique. Filler 2 plus fin que filler [52]

Le **Tableau II. 8** illustre une formulation parmi les formulations celle donnant les meilleures performances

Tableau II. 8. Formulation et performances obtenu par l'approche de J.J.CHAUVIN

Formulation		Performances obtenues
Ciment CPJ 45	350 Kg/m ³	-Résistance à la compression à 28
Sable 0/3	1345 Kg/m ³	jours = 25.5 MPa
Filler calcaire (D _{max} =40 microns)	250 Kg/m ³	- Résistance à la flexion à 28 jours = 5.3 MPa.
Eau	250 litres/m ³	-Temps d'écoulement au maniabilimètre = 7 secondes

II.5. METHODES DE FORMULATION D'UN BETON DE SABLE

Dans la littérature, il existe deux méthodes de formulation des bétons de sable, la méthode théorique basée sur l'optimisation de la compacité de squelette granulaire, et la méthode expérimentale basées sur la réalisation de gâchées successives.

II.5.1. Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable [1]

Dans le béton, les granulats jouent le rôle d'ossature dans laquelle la pâte assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion et fluidité) ; qui donne au béton frais les propriétés d'agglomération et de maniabilité, puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton durci.

Formuler un béton ordinaire consiste à optimiser le squelette granulaire, par un choix judicieux de la proportion de sables et de gravillons, puis à combler la porosité de cet empilement avec la pâte pour obtenir l'ouvrabilité désirée, cette pâte étant elle-même déterminée avec un rapport eau/ciment pour viser une résistance, une maniabilité et une durabilité données.

Le problème de la formulation d'un béton se pose principalement en terme d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité définie comme le rapport du volume solide sur le volume total, correspond au complément à l'unité de la porosité.

Caquot [45] a pu établir expérimentalement une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D), celui-ci étant caractérisé par un diamètre D et d correspondent respectivement à la dimension de tamis retenant 10% et 90% du granulat.

$$v = v_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.2} \quad (2.14)$$

Avec :

v_0 : constante empirique égale à 0.5.

Dans le cas des bétons de sable, les constituants solides sont le sable, les fines d'addition et le ciment. La fine d'addition étant de dimensions voisines de celles du ciment. L'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons ordinaires conduit généralement à des estimations du dosage des constituants déraisonnables. Il faut donc adapter la démarche de formulation pour ces bétons en repartant de la base et principalement à partir de la formule de CAQUOT.

Dans cette méthode, le dosage en fines du béton de sable, moyennant quelques hypothèses simplificatrices, correspond à la moitié de la porosité de l'étendue granulaire de sable.

$$p_s = 0,75 \left(0,08 / D \right)^{1/5} \text{ (En pourcentage volumique)} \quad (2.15)$$

0.75 : Est la valeur de la constante expérimentale qui donne la bonne estimation en terme de porosité.

Le dosage volumique optimal en fines cherchera à combler cette porosité afin d'optimiser la compacité de l'ensemble. A ce niveau, les fines complètent l'étendue granulaire du squelette solide.

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par $[fines]$ le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80 μm et $[v]$ le volume de vides associé à l'empilement de ces fines, CAQUOT a obtenu le résultat suivant :

$$[fines] = [v] \quad (2.16)$$

La porosité des fines est généralement proche de la valeur 50 %.

La combinaison de (2) et (3) donne le dosage optimal en fines, soit :

$$[fines] = 0.38 \left(0.08 / D \right)^{1/5} \quad (2.17)$$

Cette formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la limite supérieure de l'étendue granulaire, on voit clairement que plus le diamètre D diminue, plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif en terme de ciment seul.

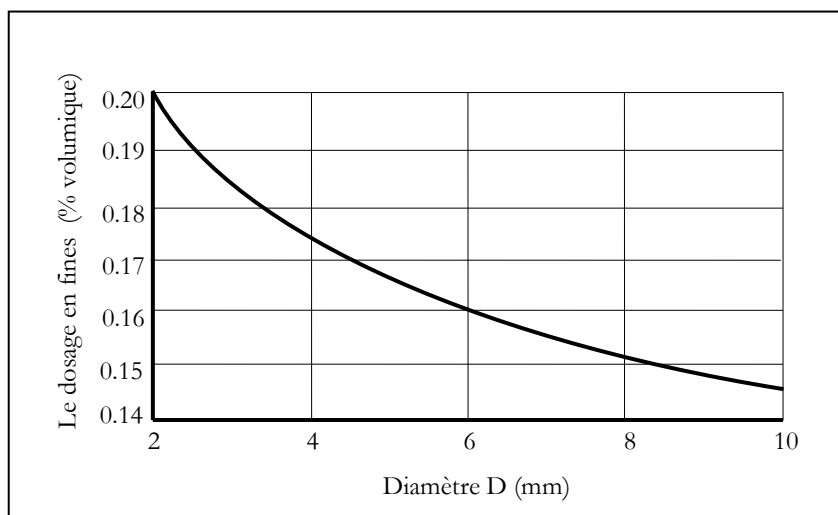


Figure II. 14. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.[1]

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v .

$$(e + v)_{\min} = 0.8 \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.18)$$

d/D l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d , borne inférieure de l'étendue granulaire. L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Ainsi, dans le cas de mélange totalement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin.

La valeur de d est donnée comme suit :

- Si le mélange est défloculé par l'utilisation d'un adjuvant :

$$d = \frac{60}{f \cdot \rho} \quad (\text{mm}) \quad (2.19)$$

Telque :

f : La finesse de Blaine des fines (cm^2/g).

ρ : La masse volumique des fines (g/cm^3).

- Si le mélange n'est pas défloculé, alors il faut prendre pour d une estimation de la dimension des floccs, entre 0.020 et 0.025 mm.

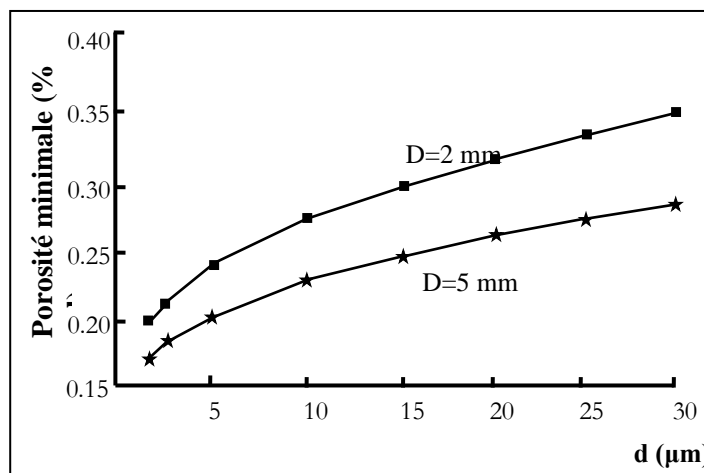


Figure II. 15. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [1]

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas des bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[vides] = k[eau] \left(\frac{l}{m^3} \right) \quad (2.20)$$

Avec k compris entre 0.2 et 0.25.

En ce qui concerne l'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors :

$$[sable] = 1000 - [fines] - [eau] - [vides] \quad \left(\frac{l}{m^3} \right) \quad (2.21)$$

II.5.2. Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons. D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent des bonnes performances. Dans cette méthode, le dosage en ciment est fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum. Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

II.5.2.1. Les différentes étapes de la formulation

A. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons déterminer une formule d'un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

- Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du

milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note : C (Kg/m³).

- Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m³), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience.

- Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 µm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, V_{air}, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ce qui donne la relation suivante :

$$V_{\text{air}} + V_C + V_E + V_{\text{adj}} + V_{\text{sable}} = 1000 \text{ (En litres)} \quad (2.22)$$

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule d'un mètre cube du béton S (Kg/m³).

- Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Lorsqu'on fait la confection de la formule initiale du béton, et la détermination de :

- La valeur du temps d'écoulement t au maniabilimètre à mortier LCL.
- La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

Cette formule doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm V \times MV_{\text{sable}} \quad (2.23)$$

Tel que : MVAT et MVAR représentent respectivement la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle du béton.

Si le temps d'écoulement au maniabilimètre est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si le temps d'écoulement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (-V dans l'équation).

Après chaque correction, la masse volumique apparente théorique devra être comparée à la masse volumique apparente réelle.

B. Détermination du dosage en fines d'addition

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optimal permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total.

L'objectif est d'obtenir une formule d'un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réel, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (2.24)$$

II.6. CONCLUSION

Nous avons présenté, dans ce chapitre, tout d'abord la méthode des plans de mélange qui va être utilisée dans notre étude pour optimiser la formulation du béton de sable haut-performance (BSHP) et quantifier l'effet de chaque paramètre sur les propriétés du BSHP. Ensuite, nous avons fait le point sur les bases statistiques qui sont appliquées aux plans d'expérience pour faire les calculs et appliquer les raisonnements corrects. Ensuite nous avons évoqués quelques exemples d'applications de plans de mélanges. Dans notre étude, le logiciel JMP7 est utilisé pour l'estimation des modèles de régression, calculs des différents paramètres.

Puis, nous avons exposé les méthodes de formulation des bétons de sable et on a adapté l'approche expérimentale de la méthode de SABLOCRETE qui est son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons. Pratiquement cette approche expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs gâchées successives, caractérisées par des mesures de la maniabilité (maniabilimètre) et de la masse volumique apparente.

CHAPITRE III
ÉTUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE**III.1. INTRODUCTION**

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Il est présent dans tous les secteurs de la construction, il est formulé avec certains constituants, chacun apporte les meilleures caractéristiques spécifiques pour fusionner et donner un matériau maniable, résistant et durable.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les caractéristiques des constituants utilisés, dans une seconde partie nous expliquons la procédure expérimentale approuvée y compris les formulations des bétons, puis nous donnons une description des différentes expériences effectuées au cours de ce travail. Les essais ont été réalisés au sein du laboratoire de matériaux du département de génie civil-faculté des sciences et de la technologie de l'université de Djelfa et au niveau de Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction Sud-Est unité régionale Djelfa L.N.H.C. L'analyse par diffraction aux rayons-X est effectuée au niveau du CRNB Centre de Recherche Nucléaire d'EL-Birine.

III.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Le ciment, le sable, les additions minérales, le gravier, le superplastifiant haut réducteur d'eau et l'eau, sont les éléments qui entrent dans la composition du béton de sable à haute performance. Ci-après, les propriétés de ces matériaux.

III.2.1. Ciment

Dans cette étude, nous avons utilisé ciment de type : ciment portland CEM I 52.5 R qui est délivré par la société LAFARGE Holcim Algérie (**Figure III. 1**), Il est conforme à la norme Algérienne NA442 inspirée de la norme européenne EN197-1 [53], les **Tableau III. 1**, **Tableau III. 2** et **Tableau III. 3**, présentent les caractéristiques physico-mécaniques ainsi que la composition chimique et minéralogique de ciment respectivement.

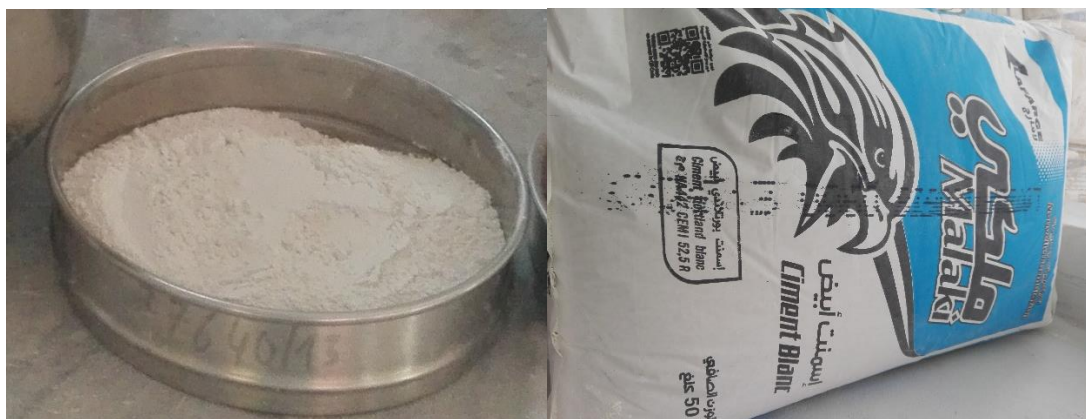


Figure III. 1. Image du ciment utilisée

Tableau III. 1. Propriétés physico-mécaniques de ciment

Caractéristiques	Ciment 52.5	
Densité spécifique (kg/m ³)	3120	
Densité apparente (kg/m ³)	1190	
Surface spécifique (m ² /kg)	470	
Résistance à la compression	2 jours	39 MPa
	28 jours	60 MPa

Tableau III. 2. Composition chimique de ciment

Analyse chimique (%)			
SiO ₂	20.9	SO ₃	3.1
Al ₂ O ₃	4.9	Na ₂ O	0.1
Fe ₂ O ₃	2.6	K ₂ O	1.3
CaO	62.8	LIO	2.3
MgO	2		

Tableau III. 3. Composition minéralogique de ciment (%)

C ₃ S	56	C ₃ A	9.5
C ₂ S	18.1	C ₄ AF	8.2

III.2.2. Sable

Dans notre étude, on a utilisé un sable alluvionnaire siliceux provient d'Oued Messâd à 80 Km au sud de Djelfa-Algérie. Il est de fraction granulaire comprise entre 80µm et 5mm (Figure III. 2 et Figure III. 3).



Figure III. 2. Image du sable utilisé



Figure III. 3. Observation microscopique du sable utilisé

III.2.2.1. Granulométrie (NFP 18-560)[54]

C'est la caractéristique physique essentielle pour l'identification des matériaux, puisqu'elle nous permet de déterminer la répartition des grains suivant leurs grosseurs.

La granulométrie des sables est représentée dans la **Figure III. 4.**

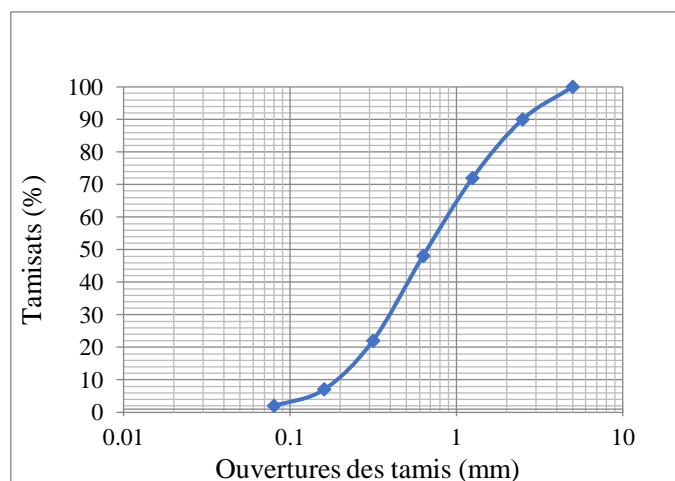


Figure III. 4. Courbe d'analyse granulométrique du sable.

III.2.2.2. Propriétés physiques du sable

Les propriétés physiques de sable utilisé tels que la densité apparente et absolue, module de finesse, équivalent de sable et coefficient d'absorption sont résumées dans le [Tableau III. 4](#).

Tableau III. 4. *Propriétés physiques du sable*

Densité apparente	1.59
Densité absolue	2.45
Module de finesse	2.54
Equivalent de sable (%) piston	81.70
Equivalent de sable (%) Visuel	90.32
Coefficient d'absorption Ab (%)	1.29

III.2.2.3. Analyse par DRX du sable

Le spectre résulte de la diffractométrie aux rayons X de l'échantillon du sable révèle la présence des pics de Quartz ce qui montre que la nature du sable est essentiellement siliceuse ([Figure III. 5](#))

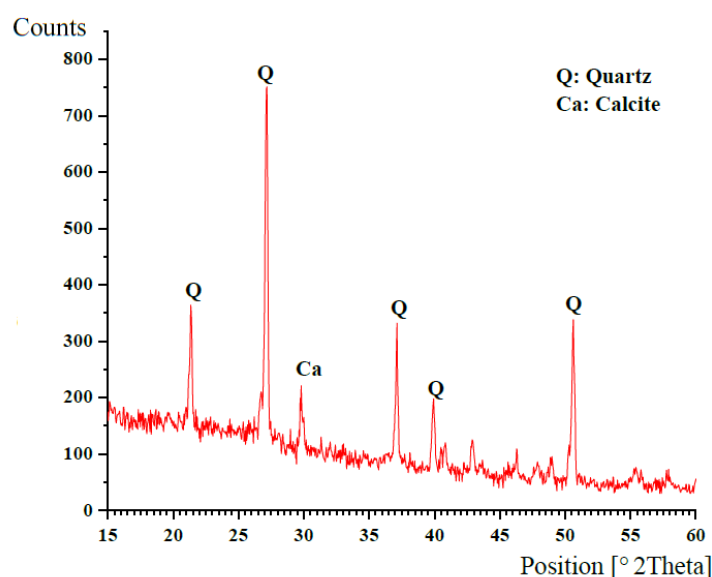


Figure III. 5. *Diffractogramme des rayons X de sable*

III.2.3. Gravier

Le gravier utilisé durant cette étude est de classe G 3/8, de provenance d'une carrière du « Wali » située au Boussaâda, Wilaya de M'sila – Algérie (Figure III. 6). Les propriétés physiques de gravier sont présentées dans le Tableau III. 5. La courbe d'analyse granulométrique est représentée dans la Figure III. 7.

Tableau III. 5. Propriétés physiques de gravier

Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1245
Masse volumique absolue (Kg/m ³)	2521
Coefficient los Angeles (%)	19.62
Coefficient d'absorption Ab (%)	0.7



Figure III. 6. Image de gravier 3/8 utilisé

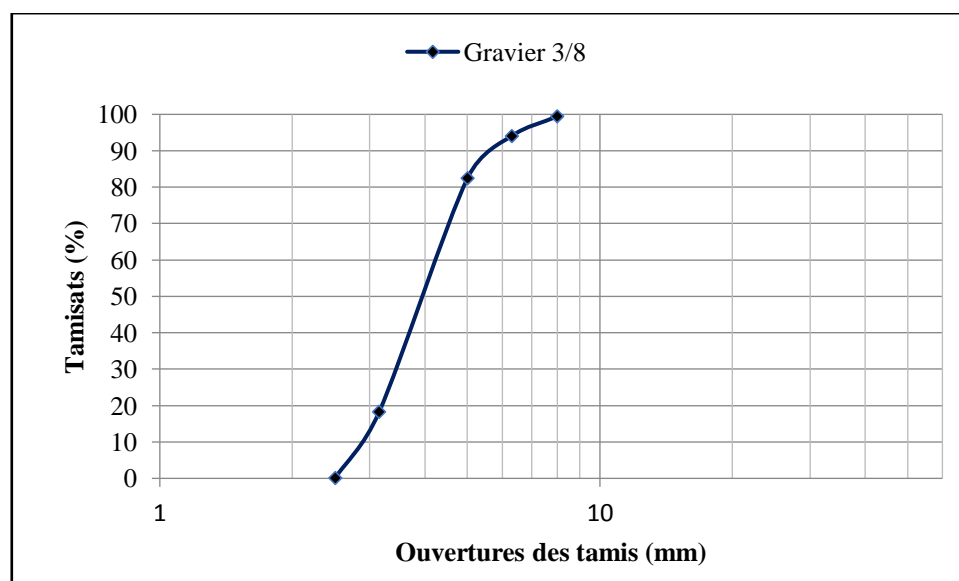


Figure III. 7. Courbe d'analyse granulométrique de gravier 3/8

III.2.4. Superplastifiant (SP)

On utilise un Superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau « medaflow 30 » conçu à base de ploycarboxylate d'éther de troisième génération qui améliorent considérablement les propriétés de béton (Figure III. 8).

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable, Le medaflow 30 ne présente aucun effet retardant. Ces caractéristiques sont présentées comme suit :

La densité = 1.07 ± 0.01 ; PH = 6 ~ 6.5 ; Teneur en extrait sec = Es= 30%.

Le dosage en superplastifiant a été fixé suite à des essais effectués au laboratoire et consistant à gâcher le béton de sable avec différents dosages en superplastifiant jusqu'à l'obtention de l'ouvrabilité désirée.



Figure III. 8. Superplastifiant GRANITEX-MEDAFLOW30

III.2.5. Eau de gâchage

L'eau (E) utilisée dans ce travail est l'eau du robinet de l'université de Djelfa, Ça température est de 20 ± 2 °C et le pH=8.04. Les résultats d'analyse chimique de l'eau sont donnés dans le Tableau III. 6.

Tableau III. 6. Analyse minéralogique de l'eau de gâchage

Espèce chimique	Quantité (mg/l)	Valeurs guides de l'OMS (mg/l)
Calcium Ca ⁺⁺	104	< 270
Magnésium Mg ⁺⁺	23.32	< 50
Chlorures Cl ⁻	92.4	< 250
Sulfates SO ₄ ⁻	170	< 400

D'après le **Tableau III. 6**, L'eau utilisée répond aux exigences de la norme NF EN 1008 :2002 [55] qui n'excède pas la limite maximale de la teneur en chlorures Cl^- de 500 mg/l et aussi pour la teneur en sulfates SO_4^{2-} de 2000 mg/l pour béton précontraint.

III.2.6. Laitier à haute fourneau

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-Hadjar Annaba, Algérie. C'est un résultat de concassage de laitier grenu jusqu'à obtenir une poudre de grande surface spécifique par rapport au ciment qui atteint 8500 cm^2/g . Le **Tableau III. 7**. Donne sa composition chimique. La masse volumique du laitier broyé utilisé est égale à 2900 Kg/m^3 .

Tableau III. 7. *Composition chimique du laitier haute fourneau*

Analyse chimique (%)	
SiO_2	41.69
Al_2O_3	7.05
Fe_2O_3	1.41
CaO	39.77
MgO	5.49
SO_3	0.15
Na_2O	0.1
K_2O	0.44
LIO	0.33

III.2.7. Fumé de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium ou des ferro-silicium par réduction en four électrique du quartz par le charbon qui fournit par GRANITEX (Algérie). Sa densité est de 2300 kg/m^3 et la valeur de la surface spécifique est supérieure à 15 000 cm^2/g . Sa composition chimique est illustrée dans le **Tableau III. 8**.

Tableau III. 8. *Composition chimique du Fumée de silice*

Analyse chimique (%)	
SiO_2	93.17
Al_2O_3	0.6
Fe_2O_3	1.25
CaO	1.2
MgO	1.02
SO_3	2.1
Na_2O	-
K_2O	1
LIO	-

III.3. FORMULATION BETON DE SABLE

La première phase consiste à la détermination de béton de sable témoin (ciment, eau et sable), pour cela une approche expérimentale adaptée celle de SABLOCRETE [1] a été utilisée. Cette approche expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs gâchées successives, caractérisées par des mesures de la maniabilité en utilisant le maniabilimètre et de la masse volumique apparente. Le résultat optimal est atteint lorsque la masse volumique apparente théorique avoisine la masse volumique réelle pour une maniabilité normale.

III.3.1. Étapes de la formulation

La composition optimale visée est celle possédant une meilleure résistance à la compression à 28 jours, et une maniabilité adéquate pour la mise en place du béton de sable (entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre).

III.3.1.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous cherchons à déterminer une formulation d'un mètre cube constituée de ciment, d'eau, et de sable, ayant une maniabilité normale.

III.3.1.2. Choix de la teneur en ciment

Le dosage de ciment est donné par l'équation suivante en fonction D_{max} des granulats : $C_{opt}=(550 \text{ ou } 700) / D_{max}$ [1]. Lorsque la valeur de $D_{max}=5$ mm, et c'est le cas du béton de sable, le dosage en ciment est entre 380 à 480 Kg/m³, pour un béton de sable haute performance, on a choisi un dosage de ciment égale à 450 Kg/m³.

III.3.1.3. Fixation d'une teneur en eau

À ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau E (L/m³), suffit pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience, alors on prend un dosage approximatif en eau pour 450 Kg en ciment égal à 270 L.

III.3.1.4. Détermination du dosage en sable

Les quantités de ciment et d'eau sont connues. Nous devons donc compléter la formule par le sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ce qui donne la relation suivante :

$$V \text{ Ciment} + V \text{ Eau} + V \text{ Sable} + V \text{ air} = 1000 \text{ (les volumes sont exprimés en litres)} \quad (3.1)$$

Soit :

$$\frac{\text{Masse de ciment}}{\text{Masse vol du ciment}} + \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse vol de l'eau}} + \frac{\text{Masse de sable}}{\text{Masse vol du sable}} + \text{vol}_{\text{air}} = 1000 \quad (3.2)$$

$$\text{Masse de sable} = 1000 - \left(\frac{\text{Masse de ciment}}{\text{Masse vol du ciment}} + \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse vol de l'eau}} + \text{vol}_{\text{air}} \right) \times \text{masse vol du sable} \quad (3.3)$$

D'après les étapes précédentes, la composition du béton de sable adopté pour 1m^3 est présentée dans le [Tableau III. 9](#).

Tableau III. 9. *Squelette granulaire adopté pour 1m^3 de béton de sable*

Ciment (kg/m^3)	Sable (kg/m^3)	Eau (l)	E/C
450	1428	270	0.6

III.3.1.5. Détermination du dosage en gravier

La deuxième phase, D'après sablocrete [1], le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable chargé. Quatre taux de gravillons (3 /8) ont été utilisés dans cette étude pour le renforcement des bétons de sable avec une substitution par une quantité du sable (G/S : 10% ; 20% ; 30% ;40%) toutes en fixant le rapport E/C. Les différentes compositions sont données dans [Tableau III. 10](#).

Tableau III. 10. *Compositions des bétons chargés utilisés.*

Constituants	Mélanges				
	N° 01	N° 02	N° 03	N° 04	N° 05
Ciment (kg/m^3)	450	450	450	450	450
Sable (kg/m^3)	1428	1300	1192	1100	1022
Gravier (kg/m^3)	0	130	238	330	408
E/C	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
G/S (%)	0	10	20	30	40

III.3.1.6. Ajustement de la maniabilité

Dans cette étape on utilise un pourcentage du superplastifiant qui estimé à 0.5% du ciment, pour réduire la quantité d'eau et ajuster l'ouvrabilité de béton. La composition du béton de sable témoin utilisé est donnée dans le [Tableau III. 11](#).

Tableau III. 11. *Composition du béton de sable témoin*

Constituants	Ciment (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravier (kg/m ³)	Eau (l)	E/C	G/S (%)	SP (%)
BS 15	450	1022	408	225	0.5	40	0.5

Les résultats en termes de résistance à la compression à 7 et 28 jours sont donnés dans chapitre IV.

III.3.2. Procédures d'essais

Un ensemble des essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de matériaux de l'université de Djelfa et d'autre au niveau de L.N.H.C a Djelfa.

III.3.2.1. Malaxage

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des bétons, il est indispensable que le sable soit régulièrement dispersé et que le ciment soit bien réparti entre et autour de tous les grains inertes,

Le malaxage est effectué au moyen du malaxeur de béton à axe vertical d'une capacité de 70 litres ([Figure III. 9](#)). La durée totale de malaxage est de 4 minutes. L'opération est faite en plusieurs étapes comme montrer la [Figure III. 10](#).



Figure III. 9. Image du malaxeur de béton utilisé

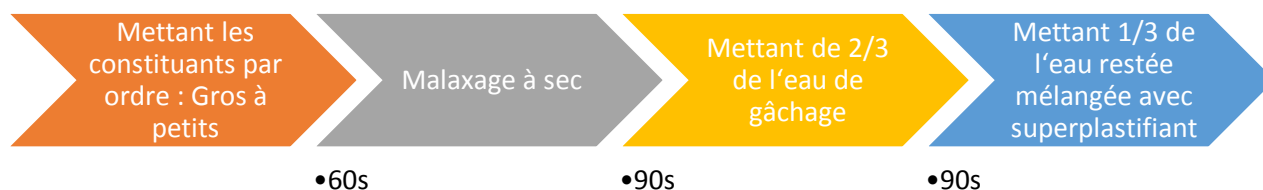


Figure III. 10. Procédure de malaxage du béton de sable

III.3.2.2. Maniabilité

À la fin de malaxage, le béton frais a été vidé du malaxeur dans un bac afin d'examiner leurs caractéristiques d'ouvrabilité en utilisant le maniabilimètre pour mesurer le temps d'écoulement (entre 7 et 10 secondes) et le cône d'Abrams pour mesurer l'affaissement selon les normes en vigueur.

A. Essai au maniabilimètre

L'essai de maniabilité d'apprécier la fluidité d'un béton de sable qu'est l'objet de l'essai définis par la norme NF P 18 – 452 [56]. Dans cet essai la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre LCL (B) (Figure III. 11), Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (7.5cm x 7.5cm x 15cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

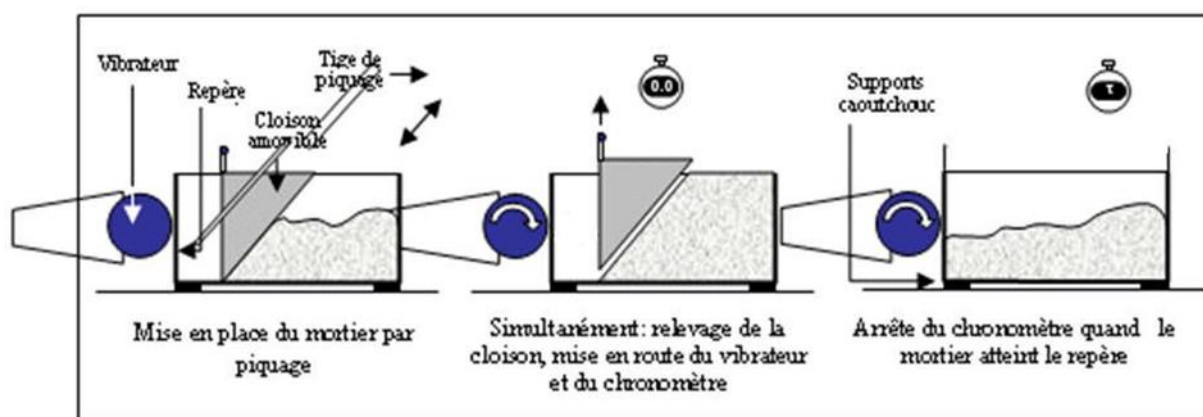


Figure III. 11. Principe de fonctionnement du maniabilimètre LCL (B)[56]

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches (Figure III. 12). Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piquage. La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre en même temps que la cloison est retirée. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

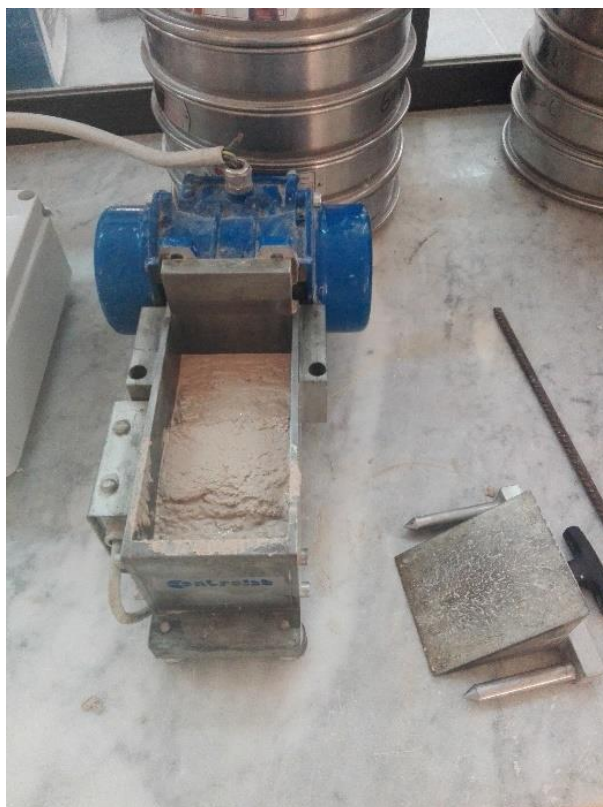


Figure III. 12. *Essai au maniabilimètre*

B. Cône d'Abrams ou slump test

La consistance peut être mesurée par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2[57]. Il est très simple et couramment utilisé. Il s'agit de remplir un moule conique métallique normalisé (20cm de diamètre à la base, de 10cm de diamètre en partie haut et 30cm de hauteur) huilé légèrement, par trois couches de gâchée du béton sensiblement égal, chacune des couches étant piquée 25 fois à l'aide d'une tige en acier ($\varnothing 16\text{mm}$). La dernière couche est arasée une fois que le moule est rempli. Après l'enlèvement du moule, le béton s'affaisse sous l'effet de son propre poids (**Figure III. 13**). La valeur de l'affaissement du béton représente la grandeur de sa consistance.



Figure III. 13. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

III.3.2.3. Les éprouvettes utilisées

Après le malaxage et l'achèvement des essais d'ouvrabilité, le béton de sable a été coulé dans les moules métalliques cubiques de $10 \times 10 \times 10$ cm, pour mesurer sa résistance à la compression conformément à la norme NF EN 12390-3[58] : et dans les moules prismatiques $7 \times 7 \times 28$ cm (Figure III. 14). Pour mesurer sa résistance à la traction par flexion selon la norme NF P 18-407[59]. Avant avoir le coulage de béton dans les moules, ces derniers ont été huilés légèrement avant leur remplissage par le béton et vibrés une fois remplis à l'aide d'une table vibrante de type UTEST UTC-0900 ayant une fréquence 50-60 vibration/seconde pour une durée de 8 secondes (Figure III. 15).

Les échantillons ont été maintenus dans des conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 h, ils ont été démoulés et conservés jusqu'au jour des tests.



Figure III. 14. Moules pour éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm



Figure III. 15. *Image de la table vibrante*

III.3.2.4. Durcissement des échantillons

Le mode de durcissement normalisée dans l'eau a été utilisé ce qui permet de d'assurer l'humidité suffisante au béton pour être bien durci. Trois éprouvettes pour chaque échéance de 15 compositions élaborées sont immergées totalement dans un bassin d'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ après son décoffrage jusqu'au jour de test conformément à la norme EN 12390-2 [58] (**Figure III. 16**).



Figure III. 16. *Image des éprouvettes conservées dans l'eau*

III.3.2.5. Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression est un paramètre primordial qui indique la qualité du Béton. L'essai de la résistance à la compression a été effectué sur une presse de la marque CONTROLAB, à vérin hydraulique équipée d'un écran LCD asservi qui permettent de configurer les paramètres de l'essai et la lecture numérique des mesures. Sa capacité maximale en charge est de 1500 ± 0.250 kN (Figure III. 17).

La valeur finale de la résistance représente la moyenne de trois mesures. Les essais de la résistance à la compression sont effectués à 7 et 28 jours pour toutes les compositions. L'exécution de l'essai est effectuée au niveau du laboratoire LNHC de Djelfa et conformément à la norme NF EN 12390-3:2012 [58].



Figure III. 17. Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression

III.3.2.6. Essai de la résistance à la traction par flexion

Les essais de la résistance à la traction par flexion en 3 points ont été effectués après une cure de 28 jours dans l'eau, ces essais sont mesurés sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ cm selon la norme NF P 18-407[59]. La Figure III. 18 représente le dispositif de l'essai. Ce test est réalisé par la même machine d'écrasement précédente qui permet de lire directement la valeur de la force de rupture ainsi que la contrainte grâce à la configuration préalable avant

l'essai. La résistance à la traction par flexion est la moyenne de trois mesures pour chaque composition à 7 et 28 jours.

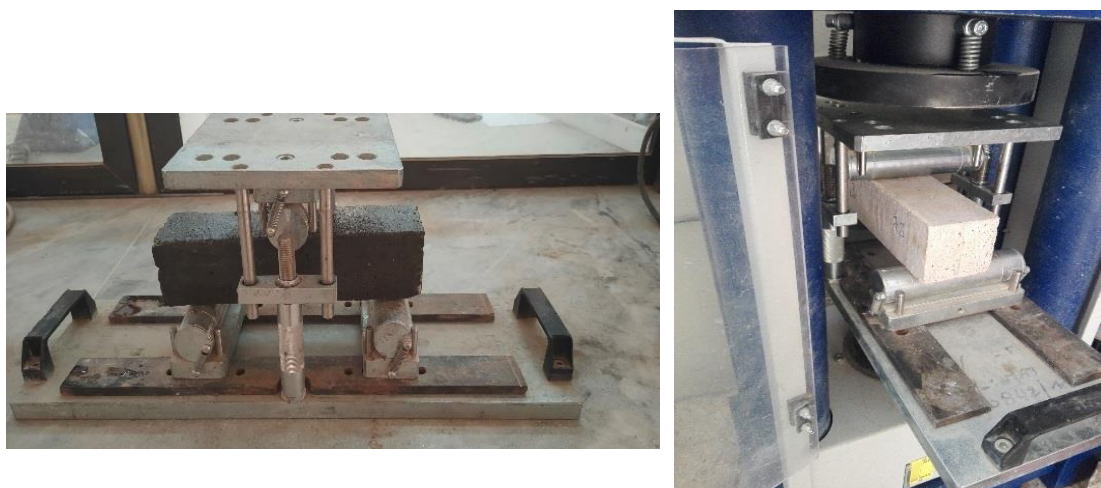


Figure III. 18. *Dispositif de l'essai traction par flexion*

III.4. CONCLUSION

Ce chapitre comprend deux parties : la première partie concerne la caractérisation des matériaux utilisés (ciment, sable, eau de gâchage, gravier, superplastifiant et ajouts minéraux), la deuxième partie s'est consacrée aux techniques expérimentales utilisées dans la détermination des caractéristiques des BS (caractéristiques physico-mécaniques). Les résultats des essais de caractérisation montrent que les matériaux utilisés sont conformes aux normes.

L'étape suivante sera consacrée à l'optimisation de la formulation de béton de sable à haut performance où nous allons présenter les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences sera utilisée afin de comprendre le rôle joué par les différents paramètres étudiés sur les propriétés de béton de formuler.

CHAPITRE IV
RESULTATS ET INTERPRETATION

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre traite l'analyse et la discussion des différents résultats obtenus au cours de cette étude. Nous utilisons l'approche de plan de mélange à plusieurs paramètres afin de modéliser les formulations optimales qui donnent les résistances maximales pour chaque type de béton. Grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7, des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais, en particulier la maniabilité et les propriétés mécaniques, ont été déterminés et développés dans ce travail. Ce chapitre est clôturé par une conclusion résumant les points essentiels peuvent tirer de cette étude.

IV.2. BETON DE SABLE TEMOIN ADOPTE

La première phase de formulation de béton de sable est commencée par la détermination de l'échantillon initial avec la méthode expérimentale du Sablocrete. Un dosage de 450kg/m^3 de ciment a été choisi. La deuxième phase ; d'après Sablocrete [1] le béton de sable chargé est un béton de sable comporter un certain pourcentage de gravillons. C'est à dire une substitution de sable par une quantité du gravier. Pour cela quatre taux de gravillons (3 /8) ont été choisies pour le renforcement des bétons de sable (G/S : 10% ; 20% ; 30% ; 40%) toutes en fixant le rapport E/C. Les résultats de différentes compositions de la résistance à 7 et 28 jours sont donnés dans le [Tableau IV. 1](#).

Tableau IV. 1. *Les compositions finales des bétons chargés utilisés*

Constituants	Mélanges				
	N° 01	N° 02	N° 03	N° 04	N° 05
Ciment (kg/m ³)	450	450	450	450	450
Sable (kg/m ³)	1428	1300	1192	1100	1022
Gravier(kg/m ³)	0	130	238	330	408
E/C	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
G/S (%)	0	10	20	30	40
CS 07 jours (MPa)	20.11	22.97	23.48	27.29	30.94
CS 28 jours (MPa)	24.73	28.31	30.14	33.67	38.73

On remarque que la résistance à la compression est augmentée proportionnellement avec l'augmentation de taux des granulats dans les différentes compositions. On peut expliquer Cette constatation par la forme des granulats concassés qui améliore l'adhérence matrice-granulats.

La troisième phase de formulation de béton de sable consiste à l'utilisation d'un pourcentage du superplastifiant (0.5%), l'objectif d'ajouter le superplastifiant été de réduire la quantité d'eau et ajuster l'ouvrabilité et améliore la résistance à la compression du béton de sable. Les résultats obtenus en termes de la résistance à la compression du béton de sable témoin BS15 est donnée dans le [Tableau IV. 2.](#)

Tableau IV. 2. *Composition finale du béton de sable témoin utilisé*

Constituants	Ciment (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravier (kg/m ³)	E/L	G/S (%)	SP (%)	CS 07 jours (MPa)	CS 28 jours (MPa)
BS 15	450	1022	408	0.5	40	0.5	37.59	43.94

La résistance du béton de sable a augmenté presque de 13% après l'ajout du superplastifiant car il densifie la structure du béton, et a permis de réduire l'eau pour obtenir une bonne maniabilité lors de la mise en œuvre. Où son rôle était de mouiller et de disperser tous les granules de ciment.

Les résultats obtenus sont satisfaits pour adopter cette composition du béton de sable et considéré comme un béton de sable témoin (BS15) et voir la possibilité de le développé a un béton du sable à haut performance avec l'utilisation du plan de mélange.

IV.3. PLAN DE MELANGE

Le but de cette étude est de chercher à optimiser la formulation des BSHP en fonction des différents constituants tels que ciment, fumée de silice et laitier haut fourneau. A cet effet un plan d'expérience a été utilisé. Ce dernier est exprimé dans notre cas par le plan de mélange, qui permet de :

- Création d'un plan conçu pour répondre à des exigences.
- Diminution du nombre des essais des plans classiques.
- Adaptation des plans aux éventuelles contraintes expérimentales.
- Proposition d'un plan pour un nombre d'essais bien défini.
- Réparation des plans mal conçus.
- Réduction du nombre d'essais des plans contenant des facteurs de mélanges et des facteurs de processus, etc.

Le processus expérimental utilisé a permis de concevoir le rôle joué par les différents paramètres séparément (dosage en ciment, en fumée de silice et en laitier de haut fourneau) sur les propriétés de béton de sable haute performance.

Ainsi, il faut traiter un plan de mélange à 3 facteurs (C, FS et LHF) pris en proportions massiques, dont la somme de ces facteurs est égale à l'unité avec une substitution du ciment atteinte au maximum 20% (90 kg de ciment) de la masse totale du ciment (**Figure IV. 1**). C'est à dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est déterminé par la relation suivante :

$$C + FS + LHF = 1 \quad (4.1)$$

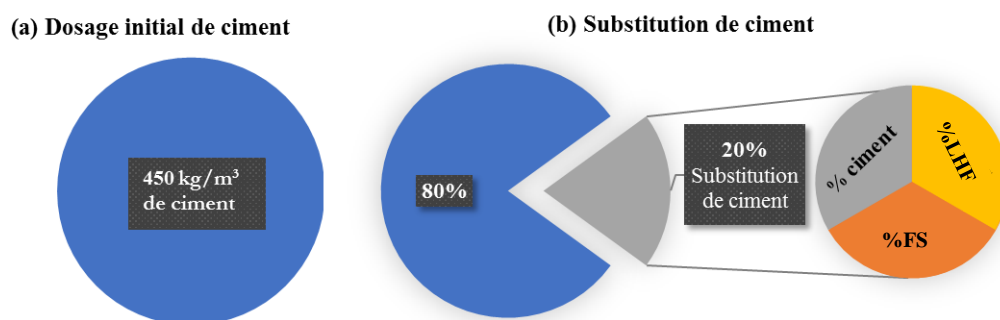


Figure IV. 1. Substitution de ciment par des ajouts minéraux.

La relation suivante permet de calculer très rapidement le nombre de compositions à préparer et à étudier connaissant le nombre de constituants du mélange et le nombre m . Pour un plan $\{q, m\}$, le nombre total de compositions différentes générés par le logiciel statistique JMP est égal à :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \tag{4.2}$$

Où : q est le nombre de facteurs, et m le nombre de niveaux.

Avec trois facteurs (C, FS et LHF) et quatre niveaux (0-0.25 ;0.25-0.5 ;0.5-0.75 ;0.75-1) et pour évaluer l'influence de ces trois facteurs sur les caractéristiques du BSHP, un plan de mélange comprenant 15 compositions a été préparé.

Le modèle adopté s'écrit sous la forme $Y = f(x_i)$ ou la fonction « f » est de type polynomial d'ordre plus ou moins élevé des x_i , qui dépend du degré de précision souhaité. Dans cette étude, le modèle polynomial d'ordre trois a été utilisé à trois variables (dosage de ciment, FS et LHF) non-indépendants et quatre niveaux. Le modèle est donné comme suit :

$$Y = a_1 \times (C) + a_2 \times (FS) + a_3 \times (LHF) + a_4 \times (C \times FS) + a_5 \times (C \times LHF) + a_6 \times (FS \times LHF) \tag{4.3}$$

Tel que : Y est la réponse du modèle utilisé.

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$: sont les coefficients du modèle qu'il faut identifier et expriment l'effet de la réponse à chaque facteur et à chaque interaction.

La **Figure IV. 2** représente un réseau triangulaire des 15 combinaisons étudiées.

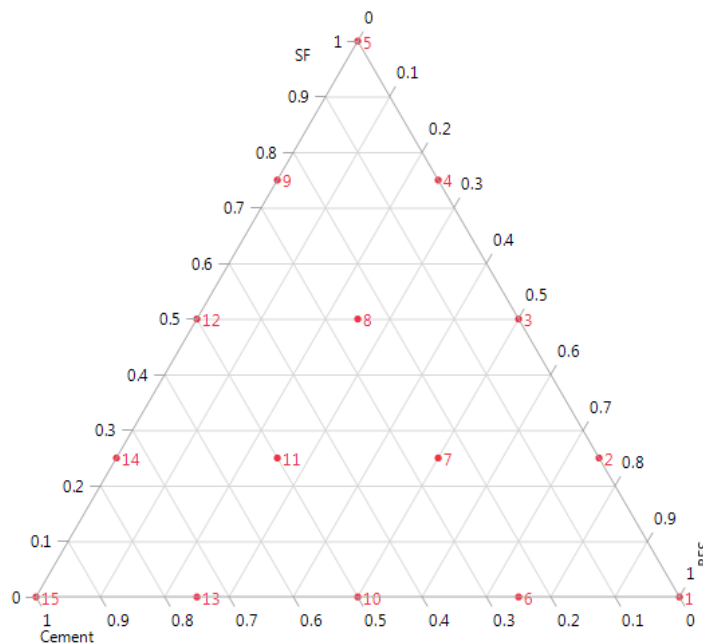


Figure IV. 2. Représentation triangulaire des 15 combinaisons étudiées à trois constituants

Les proportions des facteurs d'expérience (C, FS et LHF) générés par le logiciel sont présentées dans le **Tableau IV. 3**.

Tableau IV. 3. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées

N°	Ciment	FS	LHF
1	0	0	1
2	0	0.25	0.75
3	0	0.5	0.5
4	0	0.75	0.25
5	0	1	0
6	0.25	0	0.75
7	0.25	0.25	0.5
8	0.25	0.5	0.25
9	0.25	0.75	0
10	0.5	0	0.5
11	0.5	0.25	0.25
12	0.5	0.5	0
13	0.75	0	0.25
14	0.75	0.25	0
15	1	0	0

Les formulations sont résumées dans le **Tableau IV. 4**. Selon leurs ordres de préparations dans le laboratoire après la randomisation des essais.

Tableau IV. 4. Formulations des mélanges selon le plan de mélange

Mélanges	Ciment (kg/m ³)	FS (kg/m ³)	LHF (kg/m ³)				
BS 1	360+0	0	90				
BS 2	360+0	22.5	67.5				
BS 3	360+0	45	45				
BS 4	360+0	67.5	22.5				
BS 5	360+0	90	0				
BS 6	360+22.5	0	67.5				
BS 7	360+22.5	22.5	45				
BS 8	360+22.5	45	22.5				
BS 9	360+22.5	67.5	0				
BS 10	360+45	0	45				
BS 11	360+45	22.5	22.5	E/L	Sable (kg/m ³)	G/S	sp %
BS 12	360+45	45	0	0.5	1022	0.4	0.5
BS 13	360+67.5	0	22.5				
BS 14	360+67.5	22.5	0				
BS 15	360+90	0	0				

IV.4. EXPLOITATION DES RESULTATS DU PLAN DE MELANGE

Les résultats des 15 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois facteurs (Ciment, FS : Fumée de Silice, LHF : Laitier haut fourneaux) peuvent bien exploiter les 15 compositions dans l'élaboration des modèles mathématiques décrivant l'effet de type d'ajout sur les propriétés des BS. Dans notre cas les réponses souhaitées sont l'affaissement, la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression à 7 et 28 jours. Les réponses obtenues sont ensuite insérées dans le logiciel "JMP7". Elles sont représentées par des diagrammes ternaires sous forme de courbes iso réponses. Ces courbes peuvent être utilisées pour visualiser facilement la zone des meilleures formulations BSHP (les dosages optimaux en Ciment, FS et LHF sur le diagramme ternaire) qui répondent aux caractéristiques désirées.

IV.4.1. Modélisation de l'affaissement

Pour cette étude, l'ouvrabilité est mesurée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, selon la norme européen NF EN 12350-2[57]. Les résultats obtenus sont classés au

Tableau IV. 5. Ci-dessous :

Tableau IV. 5 . Résultats de l'essai d'affaissement

Mélange	Aff (cm)
BS 1	16.5
BS 2	14
BS 3	11
BS 4	8
BS 5	5
BS 6	13
BS 7	12.5
BS 8	10
BS 9	6.5
BS 10	10.5
BS 11	11
BS 12	9
BS 13	9
BS 14	10
BS 15	12

L'affaissement présente un écart type de 2.91 et un coefficient de variation de 27 %.

Pour la facilité de mise en œuvre du béton de sable à hautes performances, l'ouvrabilité est une caractéristique déterminante de la mesure de la qualité. Le modèle mathématique obtenu à partir du JMP est :

$$\text{Aff (cm)} = 11.24 \times C + 4.52 \times \text{FS} + 16.49 \times \text{LHF} + C \times (\text{FS} \times 4.86) + C \times (\text{LHF} \times (-12.43)) + \text{FS} \times (\text{LHF} \times 4.14) \quad (4.4)$$

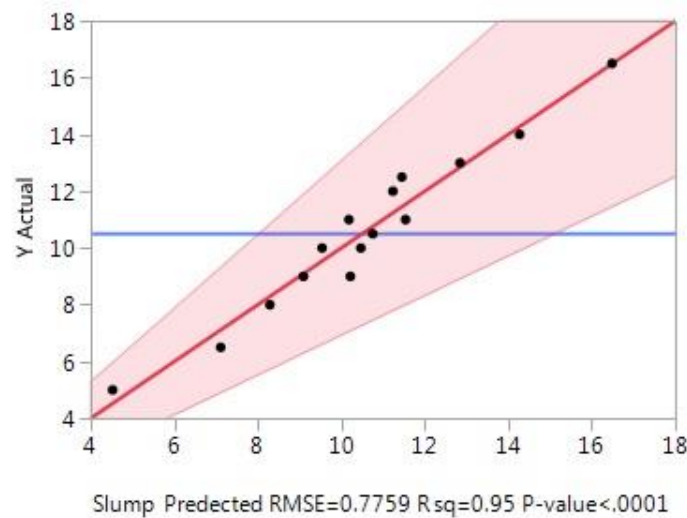


Figure IV. 3. *Graphes des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites du l'affaissement (Graphes d'ajustement du modèle)*

À partir des figures (Figure IV. 3, Figure IV. 4) qui représentent les valeurs observées par rapport aux valeurs d'affaissement prévues, on a remarqué que les points sont très proches à la ligne rouge, d'où on a conclu que le modèle prédit correctement les valeurs en fonction des facteurs choisis.

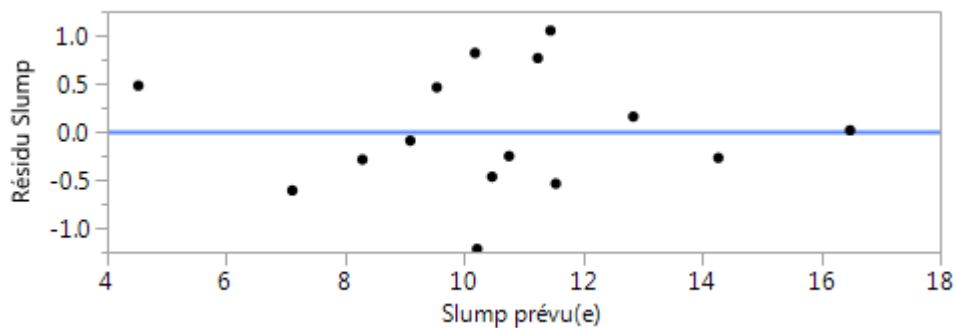


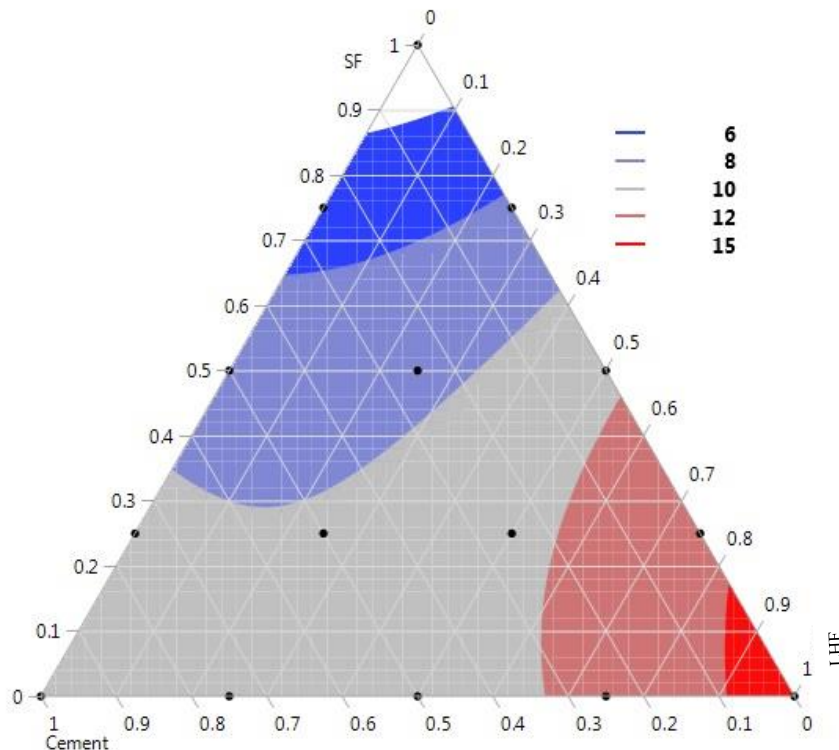
Figure IV. 4. *Résidus VS Affaissement prévus*

Tableau IV. 6. Estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées

	Affaissement	
	$R^2 = 0.95$	$P = 0.0001$
	Coeff.	p-value
a1: (C)	11.24	<.0001
a2: (FS)	4.52	<.0001
a3: (LHF)	16.49	<.0001
a4: (C x FS)	4.86	0.1252
a5: (C x LHF)	-12.43	0.0019
a6: (FS x LHF)	4.14	0.1832

R²: coefficient de corrélation. **P:** probabilité. **p-value:** est la probabilité d'obtenir une statistique encore plus extrême étant donné la vraie valeur testée à la valeur hypothétique. **Coeff.:** le coefficient estimé dans le modèle linéaire.

Le **Tableau IV. 6.** Montre les estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées, le coefficient de corrélation du modèle postulé est élevé ($R^2 = 0.95$). Ceci montre une bonne corrélation entre la réponse obtenue à partir de l'affaissement par les simulations et les valeurs prédites par le modèle trouvé.


Figure IV. 5. Courbes iso-réponses de l'affaissement

Le diagramme ternaire montré par la **Figure IV. 5** illustre bien les effets des trois facteurs étudiés sur la réponse à l'affaissement. Ce diagramme donne une idée sur l'évolution de la quantité d'intérêt en fonction des proportions de chacun des constituants.

Les résultats montrent que le type et le rapport des trois facteurs : ciment, FS et LHF, et leurs mélanges, affectent la maniabilité du béton de sable à haute performance à l'état frais.

Selon le modèle, il est à noter que la mesure de l'affaissement est fortement conditionnée par l'augmentation du rapport massique du LHF suivi du rapport massique du ciment, puis du double effet (FS/Ciment).

Enfin, le laitier haut fourneau LHF améliore généralement la maniabilité du béton. D'autre part, la fumée de silice contribue à l'adhérence du mélange de béton, ce qui peut nécessiter des ajustements pour maintenir l'opérabilité et permettre une pression et une finition appropriée. Ceci est faisable en utilisant des super plastifiant haut réducteur d'eau[60].

IV.4.2. Résistance à la flexion

Les 15 compositions étudiées ont fait l'objet d'essais mécaniques des résistances à la flexion et à la compression. Les résistances mécaniques à la flexion ont été effectuées à l'âge de 28 jours. Toutes les éprouvettes ont été confectionnées en utilisant les moules de dimensions 7x7x28 cm selon la norme NF P 18-407 [59]. Les résultats d'essai de flexion sont présentés dans le [Tableau IV. 7](#).

Tableau IV. 7. *Résultats des essais de la résistance à la flexion à 28 jours*

Mélange n°	Résistance à la flexion (MPa)
BS 1	2.56
BS 2	4.49
BS 3	4.22
BS 4	4.13
BS 5	1.90
BS 6	2.91
BS 7	4.39
BS 8	4.10
BS 9	3.24
BS 10	2.94
BS 11	4.11
BS 12	4.52
BS 13	2.81
BS 14	4.11
BS 15	3.19

La résistance à la flexion à 28 jours présente un écart type de 0.82 et un coefficient de variation de 23 %.

Le modèle mathématique obtenu à partir du JMP de la résistance à la flexion des BS étudiés en fonction de Ciment, FS et LHF à 28 jours est représentée ci-dessous :

$$Ft_{28} = 3.14 \times C + 1.87 \times FS + 2.71 \times LHF + C \times (FS \times 6.86) + C \times (LHF \times (-0.15)) + FS \times (LHF \times 9.20) \quad (4.5)$$

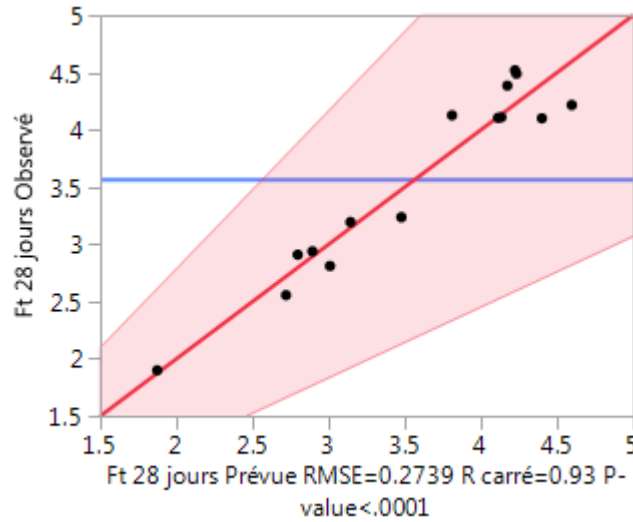


Figure IV. 6. Graphe des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites de la résistance à la flexion à 28 jours (Graphe d'ajustement du modèle)

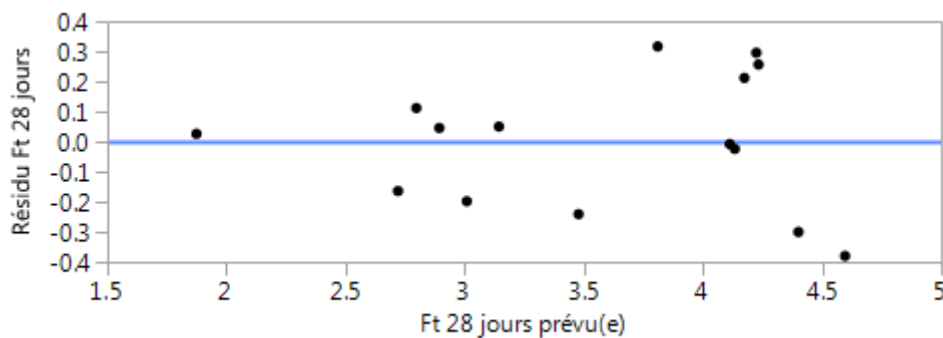


Figure IV. 7. Résidus VS Ft prévus à 28 jours

Les figures (Figure IV. 6 , Figure IV. 7) présentent une bonne distribution des points sans aucune aberrance ou structure particulière. Selon le modèle ci-dessus, la résistance à la flexion dépend aussi du taux de substitution massique du ciment par les ajouts FS et LHF.

Tableau IV. 8. Estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées

Ft28 Jours		
	R ² = 0.93	P = 0.0001
	Coeff.	p-value
a1: (C)	3.14	<.0001
a2: (FS)	1.87	<.0001
a3: (LHF)	2.72	<.0001
a4: (C x FS)	6.86	<.0001
a5: (C x LHF)	-0.15	0.8829
a6: (FS x LHF)	9.20	<.0001

R²: coefficient de corrélation. **P:** probabilité. **p-value:** est la probabilité d'obtenir une statistique encore plus extrême étant donné la vraie valeur testée à la valeur hypothétique. **Coeff.:** le coefficient estimé dans le modèle linéaire.

Le **Tableau IV. 8.** montre les estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées, le coefficient de corrélation du modèle postulé est élevé (R² = 0.93). Ceci montre une bonne corrélation entre la réponse obtenue à partir de la résistance à la flexion à 28 jours par les simulations et les valeurs prédites par le modèle trouvé. Selon le modèle ci-dessus équation (4.5), la résistance à la flexion dépend du taux de substitution massique du ciment par les ajouts FS et LHF.

De **Tableau IV. 8.** il a été constaté que les valeurs p sont inférieures à 0.05 (valeur p < 5 %), et donc les effets correspondants sont significatifs. Tous les paramètres qui ont une influence majeure sur la résistance à la flexion (ceux à fort impact) sauf le couple Ciment/LHF.

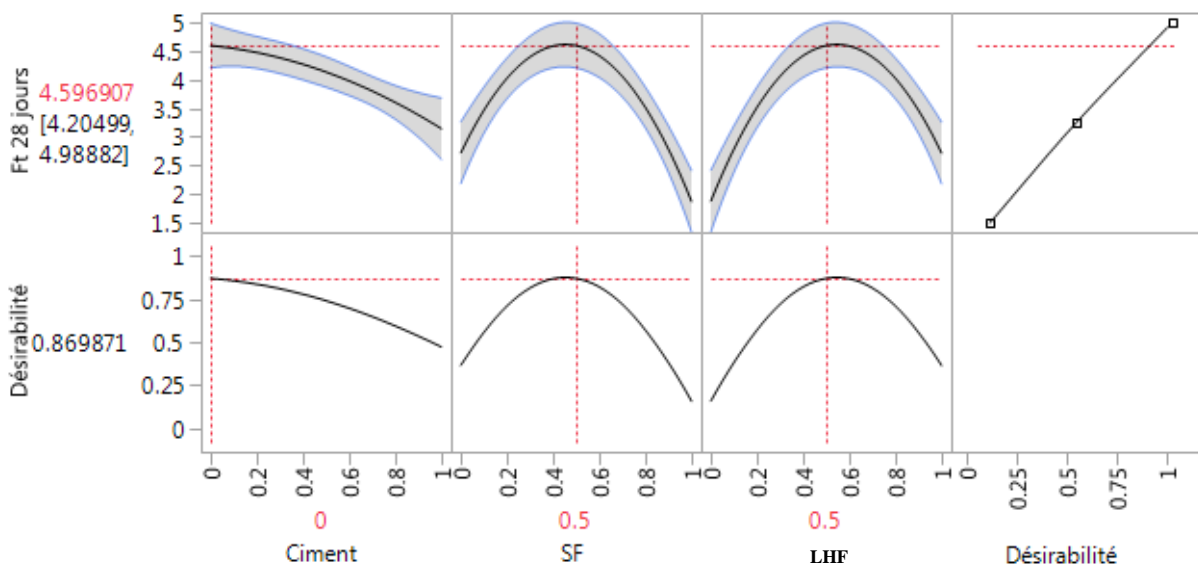


Figure IV. 8. Fonction de désirabilité pour l'optimisation de la résistance à la flexion à 28 jours

La fonction de désirabilité est très utile lorsqu'il est nécessaire de trouver le meilleur arrangement entre plusieurs réponses, cette fonction est incluse dans de nombreux logiciels de plans d'expériences [46]. La **Figure IV. 8** montre le graphique de fonction pour chaque réponse. La réponse de la résistance mécanique est fonction de trois variables : ciment, fumée de silice et laitier de haut fourneau. Un modèle est construit et les paramètres optimaux sont déterminés de manière à ce que la valeur de la force maximise la fonction de désirabilité à l'aide de l'option maximiser la désirabilité dans le profileur de prédiction. La valeur de la résistance à la flexion à 28 jours qui maximise la fonction de désirabilité est égale 4.59 MPa pour une valeur de désirabilité atteinte 87%. Une combinaison d'ensembles de niveaux de facteurs qui résulte en une résistance à la flexion prévue F_{t28} de 4.59 MPa est $C = 0$, $FS = 0.5$ et $LHF = 0.5$.

Le modèle F_{t28} représenté dans la **Figure IV. 9** sous forme des courbes iso réponses tracées sur des diagrammes ternaires.

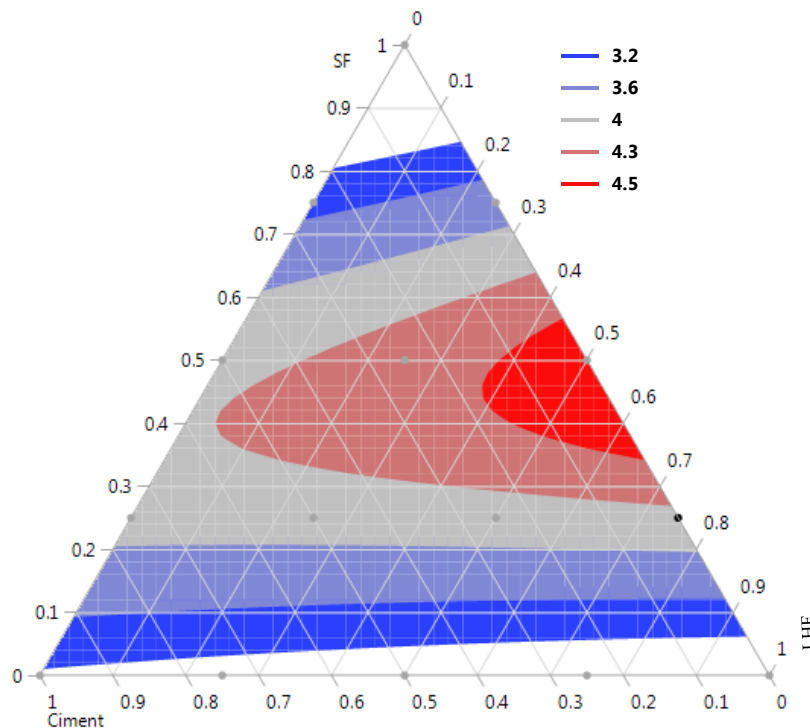


Figure IV. 9. Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion à 28 jours

A 28 jours, le béton BS12 avec 10% de FS développe la plus grande résistance à la flexion (4.52 MPa) suivi par le béton BS 2 avec 5% de FS (4.49 MPa) et le béton BS7

(4.39MPa). La résistance la plus faible est développée par le béton avec 20% de FS en poids de ciment, elle est de 1.90 MPa.

IV.4.3. Résistance à la compression

Le paramètre le plus important qui détermine les applications possibles des bétons de sable à hautes performances (BSHP) est leur résistance à la compression à l'âge de 28 jours. Le **Tableau IV. 9.** résume les résultats de la résistance à la compression pour tous les échantillons à 7 et 28 jours.

Pour cette étude, la résistance à la compression est testée selon la procédure NF EN 12390-3[58], trois cubes de dimension (10×10×10) cm³ ont été utilisés pour chaque mélange, et les valeurs moyennes de résistance de ces échantillons ont été déterminées comme résistances à la compression pour les mélanges.

Tableau IV. 9. Résultats des essais de la résistance à la compression à 7 et 28 jours

Mélange n°	Résistance Mécanique (MPa)	
	7 jours	28 jours
BS 1	34.08	35.87
BS 2	35.87	47.85
BS 3	37.57	50.32
BS 4	36.42	46.32
BS 5	35.64	41.92
BS 6	35.8	40.47
BS 7	37.22	50.93
BS 8	38.55	57.8
BS 9	37.47	49.45
BS 10	36.58	42.63
BS 11	38.98	50.39
BS 12	39.38	60.89
BS 13	37.43	43.54
BS 14	39.68	56.23
BS 15	37.59	43.94

Le béton présente une valeur maximale de résistance à la compression à 28 jours, qui peut atteindre 60 MPa grâce à des ajouts comme la FS. Les avantages constatés de l'ajout de FS sont le résultat de changements dans la microstructure du béton. Ces changements résultent de

deux aspects différents. Le premier est l'aspect physique : l'ajout de FS apporte des millions et des millions de très petites particules à un mélange de béton. Tout comme les granulats fins remplissent les espaces entre les particules de granulats grossiers, la FS remplit les espaces entre les grains de ciment. Ce phénomène est fréquemment appelé « tassement de particules » ou « micro-remplissage ». Même si les FS ne réagissent pas chimiquement, l'effet de micro-remplissage apporterait des améliorations significatives à la nature du béton.

Le second aspect est la contribution chimique : La FS est un matériau pouzzolanique hautement réactif dans le béton en raison de sa teneur élevée en dioxyde de silicium amorphe. Lorsque le ciment Portland dans le béton commence à réagir chimiquement, il libère de l'hydroxyde de calcium. La FS réagit avec cet hydroxyde de calcium pour former un liant supplémentaire appelé silicate de calcium hydraté, qui est très similaire au silicate de calcium hydraté formé à partir du ciment portland. Ce liant supplémentaire est en grande partie responsable de l'amélioration des propriétés durcies du béton de fumée de silice [61].

Tandis que la résistance à la compression présente un écart type de 1.53 à 7 jours et de 6.68 à 28 jours. Le coefficient de variation prend des valeurs de 4 % et 14 % pour 7 et 28 jours respectivement.

La construction du graphe d'adéquation du modèle est basée sur un nuage de points qui matérialise en abscisse la variation de la réponse calculée à partir du modèle prédit ainsi que sur la variation en ordonnée de la réponse mesurée.

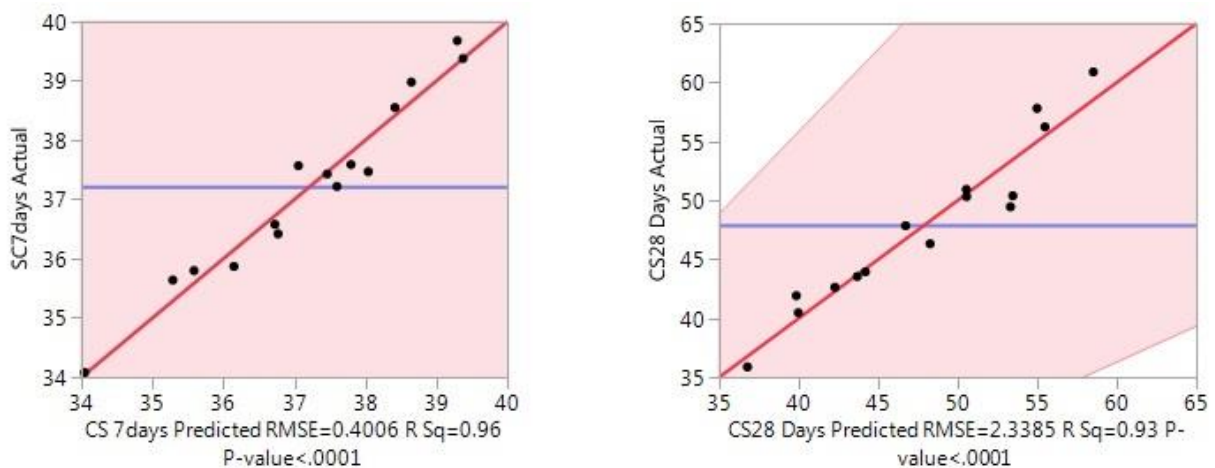


Figure IV. 10. Graphe des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites de la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours (Graphe d'ajustement du modèle)

La **Figure IV. 10** illustre les valeurs de résistance réelles par rapport aux valeurs prédites, les valeurs prédites sont proches aux valeurs observées, les points du nuage tombent près de la ligne rouge.

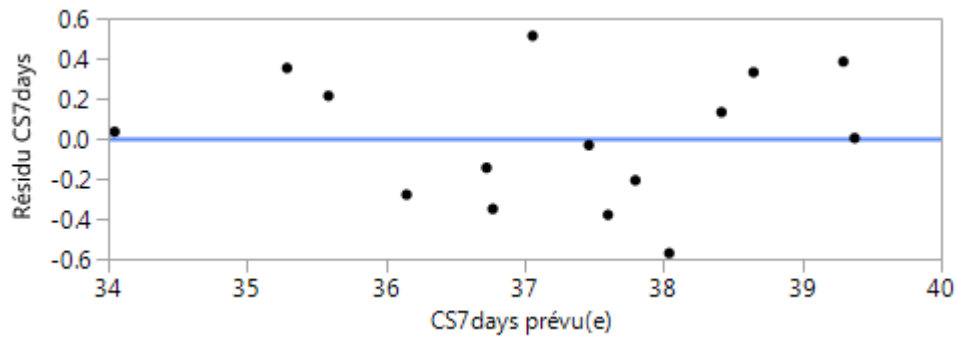


Figure IV. 11. *Résidus VS CS7 prévus*

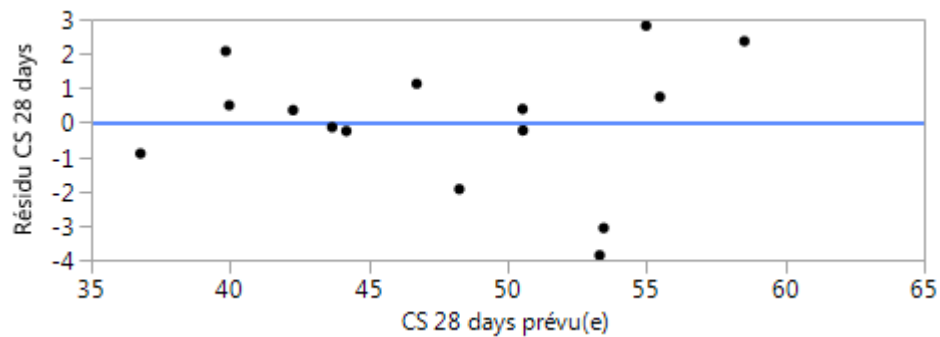


Figure IV. 12. *Résidus VS CS28 prévus*

Les figures (**Figure IV. 11**, **Figure IV. 12**) représentent les valeurs mesurées en fonction les valeurs prévues de CS et les résidus calculés de CS en fonction les valeurs prévues de CS. On voit bien que les points sont bien distribués autour de la diagonale sans aucun point aberrant. On note bien que les résidus sont bien répartis selon la teneur en Ciment, FS et LHF (les résistances prévues).

Tableau IV. 10. Estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées

	CS7 jours		CS28 jours	
	R2 = 0.96 P = 0.0001		R2 = 0.93 P = 0.0001	
	Coeff.	p-value	Coeff.	p-value
a1: (C)	37.8	<.0001	44.19	<.0001*
a2: (FS)	35.29	<.0001	39.85	<.0001*
a3: (LHF)	34.05	<.0001	36.77	<.0001*
a4: (C x FS)	11.34	<.0001	66.03	<.0001*
a5: (C x LHF)	3.21	0.0584	7.16	0.4297
a6: (FS x LHF)	9.56	0.0001	48.97	0.0003*

R²: coefficient de corrélation. **P:** probabilité. **p-value:** est la probabilité d'obtenir une statistique encore plus extrême étant donné la vraie valeur testée à la valeur hypothétique. **Coeff.:** le coefficient estimé dans le modèle linéaire. * marque les valeurs de probabilité validées par le logiciel utilisé.

Du **Tableau IV. 10**, le coefficient de corrélation du modèle supposé pour la résistance à la compression est excellent ($R^2 = 0.96$ pour CS7 jours et $R^2 = 0.93$ pour CS28 jours). Cela démontre une bonne corrélation entre la réponse obtenue à partir de la résistance à la compression par des simulations et les valeurs prédites par le modèle trouvé.

D'après le **Tableau IV.10**, on peut constater que les valeurs p sont inférieures à 0.05 (valeur $p < 5\%$), et donc les effets correspondants sont significatifs. Tous les paramètres qui ont une influence majeure sur la résistance à la compression (ceux à fort impact) sauf le couple Ciment/LHF.

Le modèle mathématique adopté pour les réponses de la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours s'écrit comme suit :

$$CS_7 = 37.80 \times C + 35.29 \times FS + 34.05 \times LHF + C \times (FS \times 11.33) + C \times (LHF \times 3.21) + FS \times (LHF \times 9.56) \quad (4.6)$$

$$CS_{28} = 44.19 \times C + 39.84 \times FS + 36.77 \times LHF + C \times (FS \times 66.03) + C \times (LHF \times 7.16) + FS \times (LHF \times 48.96) \quad (4.7)$$

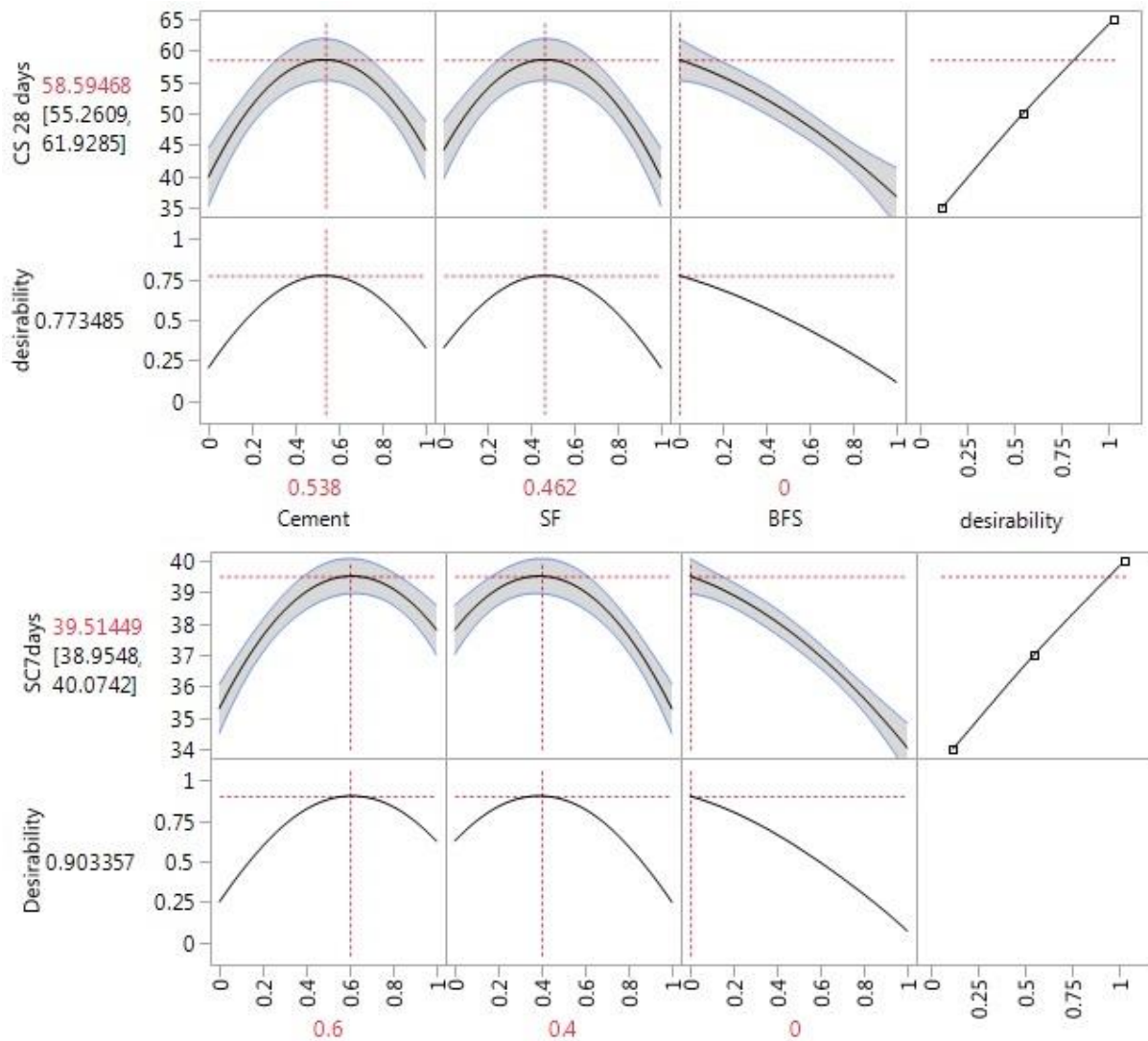


Figure IV. 13. Fonction de désirabilité pour l'optimisation de la résistance à la compression

La [Figure IV. 13](#) montre le graphique de fonction de désirabilité pour chaque réponse. Les valeurs des résistances à la compression à 7 jours et 28 jours qui maximisent la fonction de désirabilité sont respectivement de 39.51 pour une valeur de désirabilité est égale 90%, et 58.59 MPa pour une valeur de désirabilité est égale 77%. Une combinaison d'ensembles de niveaux de facteurs qui résulte en une résistance à la compression prévue CS 28 de 58.59 MPa est $C = 0.538$, $FS = 0.462$ et $LHF = 0.0$, et les résultats dans une résistance à la compression prévue CS 7 de 39.51 MPa est $C = 0.60$, $FS = 0.40$, et $LHF = 0$.

A partir des résultats des réponses en compression, il est possible de générer des graphiques ternaires montrant les effets des trois facteurs (Ciment, FS, LHF) sur la résistance mécanique à la compression à 7 jours et 28 jours ([Figure IV. 14](#), [Figure IV. 15](#)).

Les fumées de silice permettent d'augmenter très rapidement la résistance en compression des bétons surtout entre 7 jours et 28 jours de mûrissement. Il semble que l'action des fumées de silice soit plutôt effective sur la résistance en compression que sur la résistance en flexion et les différentes propriétés élastiques des bétons. L'activité pouzzolanique des fumées de silice permet la formation d'un nouveau type de CSH plus dense, ce qui a pour effet de réduire plus rapidement la porosité totale initiale des bétons[62].

Les tracés de contour sont utilisés pour identifier les conditions avec une réponse maximale ou minimale. Les tracés de contour ne peuvent afficher que trois composants à la fois. La **Figure IV. 14** et la **Figure IV. 15** montrent un tracé de contour de 7 jours et 28 jours de résistance mécanique pour le ciment, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau, les données sont représentées dans un tracé ternaire. Les parcelles ternaires se lisent comme des cartes topographiques. La zone rouge indique la zone avec la plus grande résistance mécanique. La zone brune est la deuxième résistance mécanique la plus efficace ; le gris, le bleu ciel et le bleu indiquent les zones avec une résistance mécanique de plus en plus faible.

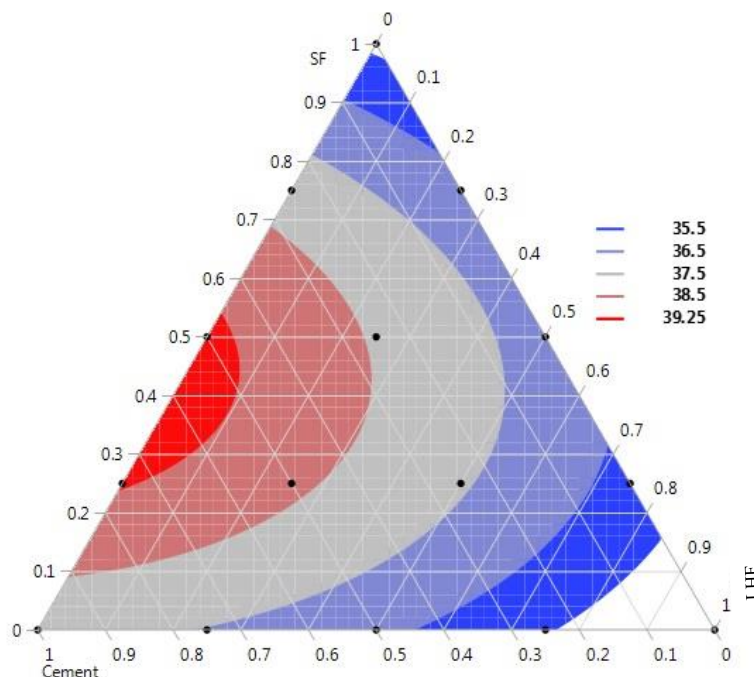


Figure IV. 14. Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours

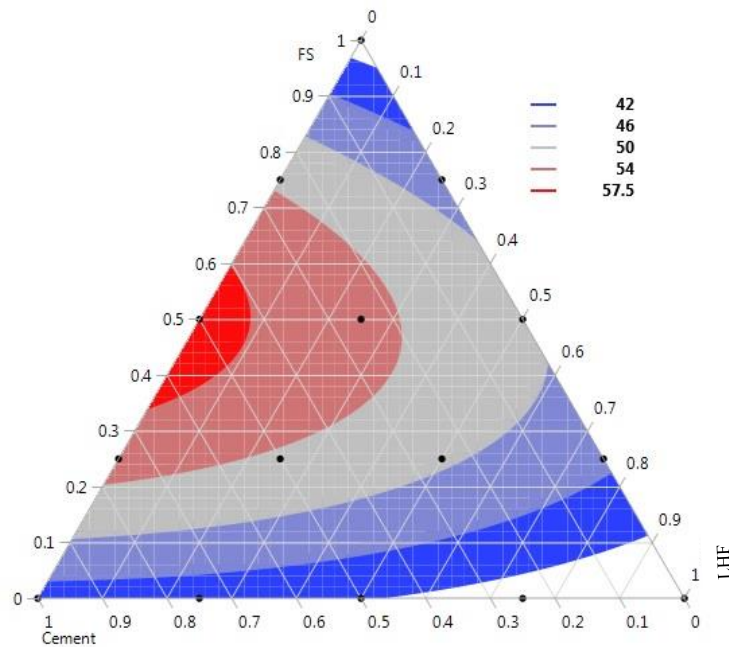


Figure IV. 15. Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours

Il a été observé que les courbes ont des formes comparables. Les résultats des [Figure IV. 14](#) et [Figure IV. 15](#) montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la proportion de FS.

La résistance maximale à la compression à 7 jours (39 MPa) a été obtenue pour le mélange binaire (60% Ciment+40% FS) ([Figure IV. 14](#)). La [Figure IV. 15](#) montre également que la résistance à la compression maximale à 28 jours (58 MPa) a été obtenue pour le mélange binaire avec des proportions de 0.45 de FS et 0.55 de ciment.

IV.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'approche du plan de mélange pour 3 facteurs et quatre niveaux a été appliquée afin d'optimiser la formulation d'un béton de sable à haute performance (BSHP). On a étudié les effets de la substitution partielle du ciment par des additifs minéraux, FS et LHF sur les propriétés physico-mécaniques du BSHP.

Les résultats montrent un excellent d'accord entre les modèles expérimentaux et mathématiques, démontrent également la robustesse et l'utilité de l'approche de plan de mélange. Cette approche a permis de visualiser l'effet (FS) et (LHF) sur les caractéristiques du (BSHP).

Les réponses obtenues par l'étude des échantillons de béton de sable à l'aide des modèles mathématiques développés présentent d'excellents coefficients de corrélation pour l'affaissement, la résistance à flexion et la résistance à la compression ($R^2=0.96$ pour CS7, $R^2=0.93$ pour CS28, $R^2=0.95$ pour l'affaissement et $R^2=0.93$ pour Ft₂₈).

Le ciment a le plus grand coefficient dans les modèles de la résistance mécaniques, donc l'effet de dosage en ciment est le plus important sur la résistance du BSHP.

Il est possible de formuler un BSHP, avec une résistance à la compression d'environ 60 MPa, en 28 jours, en remplaçant 10 % du poids de ciment par FS.

La résistance à la compression de 58 MPa peut également être atteinte dans les mélanges ternaires, en utilisant deux additifs tels que FS (10%) et LHF (5%) par remplacement partiel du poids de ciment (15%).

Selon le modèle mathématique d'affaissement, les coefficients de FS et LHF sont respectivement d'environ 40.21 % et 146.71 % de celui du ciment. Le LHF améliore la maniabilité du béton BSHP, contrairement au FS.

CHAPITRE V
ÉTUDE DE LA DURABILITE

CHAPITRE V

ÉTUDE DE LA DURABILITE

V.1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau poreux. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de protection des bétons contre toutes les attaques agressives [63]. Dans ce chapitre, nous discutons l'effet des ajouts sur l'absorption capillaire et sur dégradation du béton dans les milieux agressifs (HCl et H₂SO₄) après 30, 90, et 180 jours d'immersion totale. Pour évaluer la durabilité de béton de sable à hautes performances vis-à-vis l'attaque chimique, Les mélanges BS8 (mélange ternaire), BS12, BS13 (mélanges binaires) et BS15 (témoin) ont été choisi. Les ajouts minéraux FS et LHF peuvent modifier le comportement chimique des BS dans un milieu agressif. On a étudié la sorptivité et la variation de masse de BS formulés.

V.2. ESSAIS DE DURABILITE

Afin d'évaluer la durabilité des bétons durcis deux essais de durabilité ont été réalisés : essai de l'absorption capillaire ou la sorptivité, l'essai de l'évaluation de la résistance vis-à-vis l'attaque par les acides chlorhydrique HCl et sulfurique H₂SO₄. Les essais ont été réalisés au sein du laboratoire de matériaux du département de génie civil- de l'université de Djelfa. Pour réaliser ces essais, quatre compositions du BS ont été choisis, comme montrer dans le

Tableau V. 1.

Tableau V. 1. *Compositions du BS choisie pour la durabilité*

	Composition			
	BS8	BS12	BS13	BS15 (témoin)
FS	10%	10%	0	0
LHF	5%	0	5%	0

V.2.1. Essai de l'absorption capillaire (sorptivité)

L'absorption capillaire ou la sorptivité par immersion est donc le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette cubiques $7 \times 7 \times 7$ cm de béton dans l'eau pour une hauteur de 5mm. La face inférieure de l'éprouvette est appuyée sur des supports et les faces latérales sont imperméabilisées par une résine époxydique afin d'avoir seulement la surface inférieure en contact avec l'eau et d'assurer une absorption unidimensionnelle et en mesurant la variation de la masse jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Cette propriété est traduite par le coefficient de sorptivité (S) qui est influé de plusieurs facteurs tels que l'âge du béton, la composition, la porosité, le temps d'immersion, la cure etc.

La sorptivité (S) des BSHP testés est mesurée après 28 jours de la cure des éprouvettes dans l'eau. Avant de mesurer la sorptivité, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à environ de 105°C jusqu'à l'atteint d'une masse constante afin d'éliminer l'eau emprisonnée dans les pores capillaires. La **Figure V. 1.** représente le schéma de l'essai.

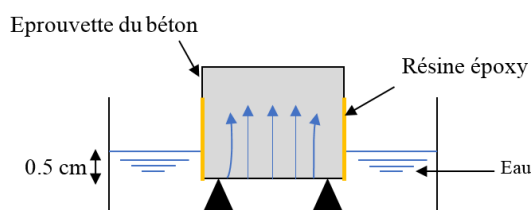


Figure V. 1. Principe de mesure de l'absorption capillaire (sorptivité)

L'augmentation en poids de l'éprouvette est mesurée après t^2 avec $t = [1, 8] t \in \mathbb{N}$ d'où t exprimé en minutes le temps de l'immersion. Pour chaque temps de mesure, l'éprouvette est retirée et essuyée avec un chiffon humide et mettre en balance, puis re-immersée dans l'eau.

La sorptivité (S) est déterminée à l'aide de la formule :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad (5.1)$$

Avec :

S : le coefficient de sorptivité en $(\text{cm}/\text{sec}^{0.5})$;

Q : le volume de l'eau absorbée en cm^3 ;

A : la surface en contact avec l'eau en cm^2 ;

t : le temps écoulé en secondes ;

La sorptivité (S) représente graphiquement la pente de la régression linéaire de (Q/A) en fonction de \sqrt{t} .

V.2.2. Essai de dégradation dans les acides HCl et H₂SO₄

Dans le but de mettre en évidence le comportement des bétons de sable en milieux agressives nous avons effectué une série d'essais de la durabilité chimiques. L'essai de l'attaque par les acides HCl et H₂SO₄ permet d'évaluer la capacité du béton à résister à la dégradation lorsqu'il est capable d'exposer à un environnement agressif

La procédure d'essais consiste à préparer des éprouvettes cubiques $7 \times 7 \times 7$ cm des quatre compositions du BS (09 cubes pour chaque composition), conservé dans l'eau pour une durée de 28 jours, trois cubes de chaque composition sont immergés dans l'eau distillée et les autres cubes d'éprouvettes équitablement immergés complètement dans les solutions : HCl et H₂SO₄ avec une concentration de 5% (Figure V. 2). Ce dosage est couramment utilisé dans la littérature afin d'accélérer le processus de dégradation[22], [64]–[67].



Figure V. 2. Conservation des éprouvettes dans les milieux agressifs : 5% HCl et 5% H₂SO₄

Avant de commencer les essais, les échantillons ont été séchés dans un milieu de 20 °C de température et 50% d'humidité relative pendant 24 heures pour enregistrer leurs masses initiales.

V.2.3. Eau douce

Les éprouvettes du BS utilisées dans la détermination de la durabilité sont conservées après leur démoulage dans ce milieu. L'eau utilisée est celle du réseau du laboratoire de matériaux du département de génie civil- de l'université de Djelfa, sa composition chimique est décrite dans le chapitre III (**Tableau III. 6**) et elle est de la même source que celle utilisée dans le malaxage du béton.

V.2.4. Perte de masse

La formule suivante permet de calculer la perte de la masse de chaque échantillon :

$$\text{La perte de masse } \Delta M (\%) = [(M_0 - M_j) / M_0] \times 100 \quad (1) \quad (5.2)$$

Tel que : M_0 : Masse initial.

M_j : Masse finale après immersion dans les solutions (j=28,90 et 180 jours).

La dégradation du BS par les acides a été évalué visuellement (examen visuel) et physiquement (variation de masse). La variation de la dégradation massique par l'attaque des acides a été mesurée après 28, 90 et 180 jours d'immersion. À chaque mesure, Les échantillons ont été extraits de solution et lavés pour éliminer les produits de réaction en vrac, puis laissé à sécher dans le même milieu que le précédent pendant 30 min avant l'évaluation.

V.3. RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

V.3.1. Absorption capillaire (la sorptivité)

La sorptivité (S) des BS testés est mesurée après 28 jours de la cure des éprouvettes dans l'eau. Avant de mesurer la sorptivité, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à environ de 105°C jusqu'à l'atteint d'une masse constante afin d'éliminer l'eau emprisonnée dans les pores capillaires l'absorption capillaire est caractérisée par le coefficient de sorptivité (S).

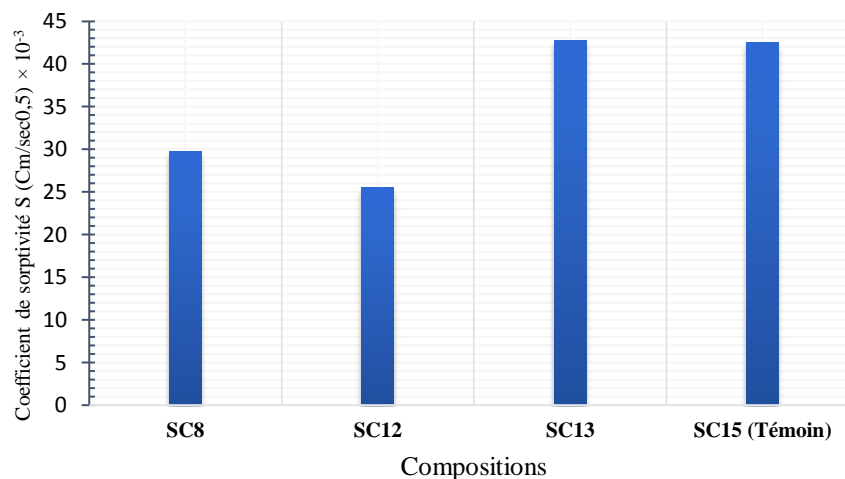


Figure V. 3. Coefficients de sorptivité

Les coefficients de sorptivité des quatre formulations BS8, BS12, BS13 et BS15 sont reportés dans l'histogramme de la **Figure V. 3.** et montrent une variabilité avec la formulation. À 28 Jours, les coefficients S des formulations BS8, BS12, BS13 représentent 70%, 60% et 100% respectivement de celui du BS15 (béton témoin).

Les résultats montrent que l'absorption du béton BS13 (5% de LHF) est similaire à celui de béton BS15 (Témoin) ; DEBOUCHA *et al* [68] montre que la porosité totale avec ajout de laitier est plus ou moins similaire à celle du mortier sans ajout, alors que l'absorption capillaire est limitée dans le cas du mortier avec ajout de laitier.

L'ajout de laitier induit généralement une augmentation de la porosité en comparaison d'un mélange contenant du ciment portland seul. Toutefois, à long terme, la réaction du laitier entraîne une porosité totale qui est souvent globalement du même ordre de grandeur que celle du mélange sans laitier[69].

Dans la formulation BS12, un ajout de 10% de fumée de silice FS a diminué la sorptivité de 40%, et pour la formulation BS8, la substitution de 15% (10% FS + 5% LHF) de masse du ciment a réduit la sorptivité de 30%.

L'activité pouzzolanique des fumées de silice permet la formation d'un nouveau type de CSH plus dense, ce qui a pour effet de réduire plus rapidement la porosité totale initiale des bétons et des mortiers. La quantité d'eau absorbée varie avec le pourcentage de SiO₄. Cette variation est reliée directement à la dimension des pores. Toute augmentation de la quantité d'eau absorbée impliquerait donc l'existence d'un réseau de capillaires plus fin. Toute diminution de l'eau absorbée impliquerait la présence d'une surface spécifique interne des pores plus grands [62].

Selon Ghrici et al [70], La sorptivité des mortiers dépend de la quantité des ajouts et de leur réactivité chimique. Les sorptivités des mortiers est inférieure à celles du mortier témoin à l'âge de 28 jours.

Benamara *et al* [33] ont trouvé à son étude que pour les bétons avec ajouts, l'absorption capillaire diminue lorsque le % de sable de dune (SD) augmente (5%, 10 et 20%). Ceci est attribué outre le rôle pouzzolanique partiel de SD, à son rôle physique de remplissage. De par la finesse du SD, supérieure à celle du ciment, les grains de SD s'insèrent entre ceux de ciment engendrant ainsi une diminution des dimensions et du pourcentage des pores capillaires. La fumée de silice FS se comportent de la même manière que le sable de dune, néanmoins leur influence sur la compacité du béton est plus accentuée en raison de leur grande finesse et leur état vitreux qui leurs confère une importante réactivité pouzzolanique et donc une réduction notable de l'absorption capillaire.

La **Figure V. 4.** suivante représente la corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression à 28 jours. On remarque sur la **Figure V. 4.** qu'il y a une relation inverse entre les deux, plus le coefficient de sorptivité est grand la résistance à la compression est diminuée. Ceci a également été observé par plusieurs chercheurs[71].

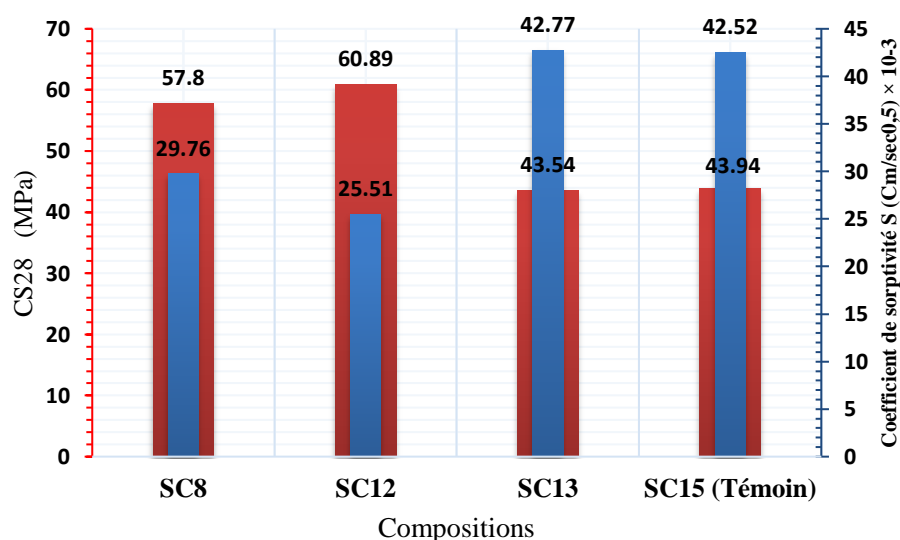


Figure V. 4. La sorptivité S vs la résistance à la compression CS_{28}

Au contraire, Leung *et al* [72], ont trouvé que la sorptivité est inversement proportionnelle au pourcentage des ajouts et qu'il n'y a aucune corrélation évidente entre la résistance mécanique à la compression à 28 jours du béton et la sportivité lorsqu'ils étudié

l'effet de la substitution du ciment par les cendres volantes (FA) et de la fumé de silice (FS) sur la résistance mécanique et la sorptivité du béton autoplaçant (BAP).

V.3.2. Résistance à l'attaque chimique H₂SO₄ et HCl

Le béton peut être confronté à des environnements agressifs, ces milieux peuvent changer certains facteurs physiques et chimiques et causer un danger significatif pour le béton. Dans ce qui suit, on discute la variation de masse du BS dans des milieux d'agressivité différente lorsque le ciment est partiellement substitué par FS et LHF. Trois milieux ont été testés comme milieux agressifs (l'eau distillée comme environnement de référence, 5% HCl et 5% H₂SO₄, L'évaluation de l'attaque passe par deux contrôles, examen visuel et la variation de la masse.

Dans cet essai, trois éprouvettes cubiques pour chaque composition sont conservées dans l'eau douce, comme illustré dans la [Figure V. 5](#).



Figure V. 5. Conservation des éprouvettes dans l'eau douce

La [Figure V. 6](#). Ci-après montre la variation de la masse du BS exprimée en pourcentage a été mesurée à la fin de chaque période de 28, 90 et 180 jours d'immersion de différents éprouvettes cubiques conservé dans l'eau douce.

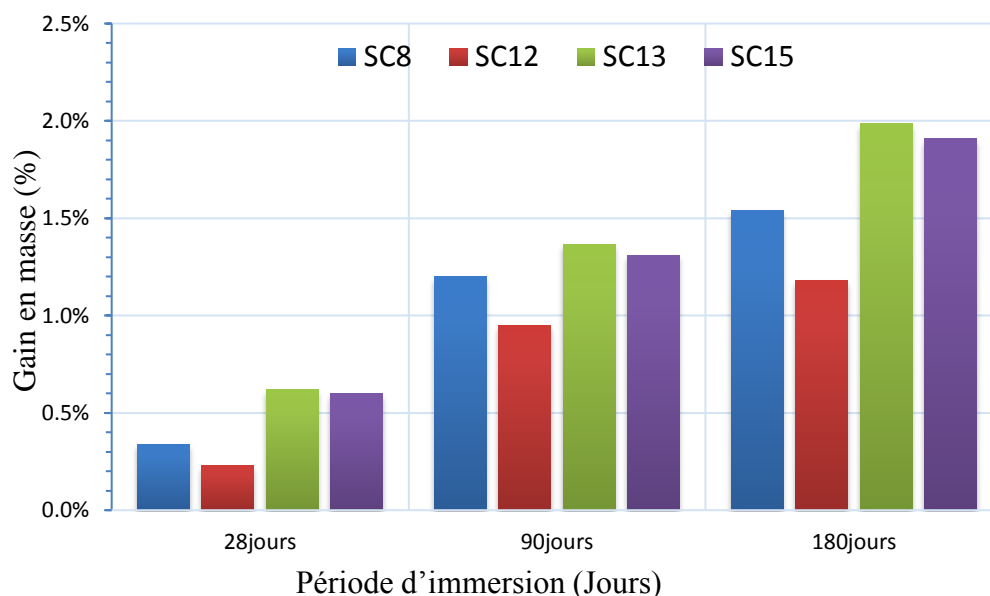


Figure V. 6. *Variation de la masse en fonction de la période d'immersion dans d'eau*

La **Figure V. 6.** montre qu'il y a une augmentation progressive de la masse des BS pendant toutes les périodes (28,90 et 180 jours), c'est-à-dire que tous les BS ont subi des gains de masse. Cette dernière est variée entre 1.18% à 1.99% après 180 jours d'immersion. Les gains en masse enregistrés sont dus à l'hydratation continue des grains de ciment grâce à la présence de l'eau qui contribue à la formation de nouveau CSH rendant la structure du béton plus dense[71]. De plus, on peut constater que les deux bétons de sable BS8 (5%FS+10%LHF) et BS12 (10%FS) ayant le moins gain de masse à 180 jours, cette différence peut être expliquée par la grande compacité de ces deux bétons par rapport aux autres. Cette soustraction peut également justifier par le coefficient de sorptivité capillaire faible de ces deux bétons, c'est-à-dire ce sont les compositions les moins poreuses ce qui empêche l'infiltration de l'eau.

V.3.2.1. Milieu de l'acide chlorhydrique HCl

Afin de suivre de la perte de masse de CS par l'attaque d'acide chlorhydrique HCl, trois échantillons cubiques pour chaque composition sont immergés dans la solution de HCl avec une concentration de 5%, comme présenté dans la **Figure V. 7.**



Figure V. 7. Conservation des éprouvettes dans la solution d'acide chlorhydrique 5% HCL

A. L'examen visuel

La **Figure V. 8.** montre clairement une légère déformation des BS par l'acide chlorhydrique HCl, surtout sur l'état de la surface de l'échantillon qui est superficiellement détérioré tandis que l'attaque chimique était moins sévère, cependant la dégradation des granulats est très importante par rapport la pâte de ciment. On remarque aussi l'apparition des cristaux transparents sphériques arrondies sur la surface après l'extraction des éprouvettes de l'acide.



Figure V. 8. Aspect des éprouvettes après 180 jours dans l'acide chlorhydrique HCL

B. Perte de la masse

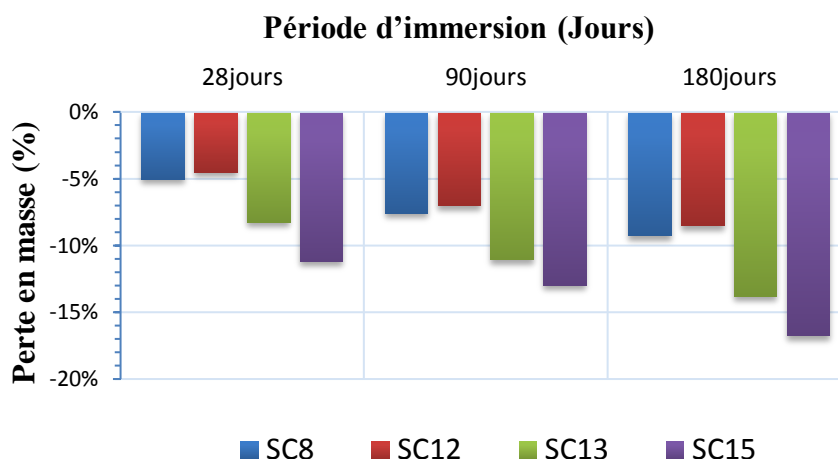


Figure V. 9. Perte de masse dans l'acide chlorhydrique 5% HCl

La [Figure V. 9](#) représente les histogrammes de pertes de masse, en pourcentage des échantillons conservés dans la solution d'acide chlorhydrique HCl de 5% après 30, 90 et 180 jours, Le BS8 et le BS12 représentent une bonne résistance à l'attaque chimique par l'HCl par rapport les autres bétons. La perte de masse de béton BS8 et le BS12 est de 9.28% et 8.53% respectivement après 180 jours de conservation, BS13 et BS15 représentent les pertes de masse les plus élevées de 13.81% et 16.75% après 180 jours d'attaque chimique.

La réaction chimique de l'acide chlorhydrique avec la chaux libérée de l'hydratation du ciment, comme indiqué dans l'équation (5.3), produit du chlorure de calcium (CaCl_2), qui est un sel très soluble et très nocif pour le béton



V.3.2.2. Milieu de l'acide sulfurique H_2SO_4

On refaire les mêmes étapes qui réalisés dans l'essai d'attaque par l'HCL, trois éprouvettes cubiques pour chaque composition sont immergés dans la solution d'acide sulfurique H_2SO_4 de 5% de concentration, comme montré dans la suivante ([Figure V. 10](#)).



Figure V. 10. Conservation des éprouvettes dans la solution d'acide sulfurique 5% H_2SO_4

A. L'examen visual

Après examen visuel (**Figure V. 11**), on a constaté une déformation assez importante des parois extérieures des bétons. On note que les éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique ont une couleur claire comparativement de celle conservée dans l'acide chlorhydrique qui prend une couleur foncée. On note aussi l'apparition des dépôts blanchâtres sur la surface des éprouvettes et dans la solution de conservation. En effet, l'acide H_2SO_4 a attaqué la pâte de ciment, pour cette raison les endommagements du béton commencent à la surface et causé l'érosion des granulats, conjointement avec la lixiviation de pâte de ciment dans le récipient. On peut constater aussi que l'acide H_2SO_4 est très agressif par rapport à l' HCl .



Figure V. 11. Aspect des éprouvettes après 180 jours dans l'acide sulfurique H_2SO_4

B. Perte de la masse

La **Figure V. 12.** montre l'évolution de la perte de masse des spécimens des différents mélanges de bétons de sable étudiés en fonction de la durée de conservation.

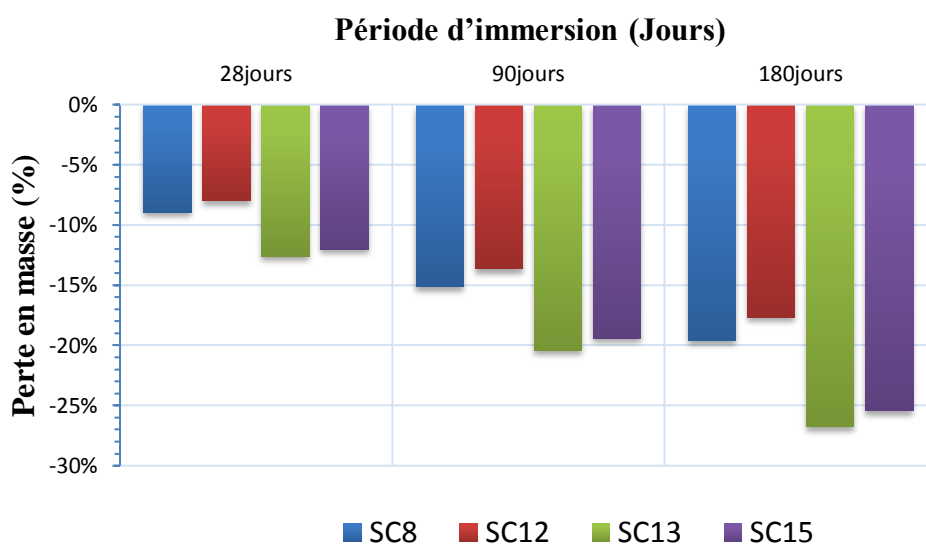


Figure V. 12. Perte de masse dans l'acide sulfurique 5% H_2SO_4

Il est important de constater qu'après 180 jours de conservation dans H₂SO₄, toutes les éprouvettes sans exception accusent des pertes en masse illustrées dans la **Figure V. 12.** et présentant une évolution identique : une perte en masse rapide comparativement à celle de HCl. Les pertes de masse après 180 jours d'attaque sont respectivement 19.59%, 17.65%, 26.74% et 25.41% dans les formulations BS8, BS12, BS13 et BS15.

La détérioration des bétons immergés dans des solutions acides est principalement due à la décomposition des produits d'hydratation et à la formation de nouveaux composés. La réaction d'un acide avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment donne naissance à un sous-produit calcique très soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement éliminés de la pâte de ciment affaiblissant ainsi la structure totale de la pâte[73].

L'acide sulfurique (H₂SO₄) est doublement agressif par son acidité et l'ions SO₄²⁻ qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite retardée. Le processus est illustré par la réaction chimique suivante :



Les milieux acides ou sulfatiques susceptibles d'être agressifs pour le béton peuvent se décrire de la manière suivante :

- Attaque acide : dissolution de la chaux hydratée avec formation de gypse.
- Attaque sulfatique: réaction entre les aluminates du ciment et le gypse pour former de l'ettringite [74].

V.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a analysé les résultats des essais de sorptivité à l'âge de 28 jours et les variations de masse dans trois milieux de conservation différents l'eau douce, 5% HCl et 5% H₂SO₄ pendant 180 jours, À partir les résultats trouvés, on peut conclure que :

La substitution du ciment par 10% de FS a diminué la sorptivité de 40%, la relation entre la sorptivité et la résistance à la compression à 28 jours est inverse, plus le coefficient de sorptivité est grand la résistance à la compression est diminuée.

Après 180 jours d'immersion dans d'eau, les deux bétons de sable BS8 et BS12 ayant le moins gain de masse, cette différence est expliquée par la grande compacité de ces deux bétons par rapport aux autres.

La perte de masse de béton BS8 et le BS12 est de 9.28% et 8.53% respectivement après 180 jours de conservation dans l'acide chlorhydrique HCl, le BS8 et le BS12 représentent une bonne résistance à l'attaque chimique par l'HCl par rapport les autres bétons. La réaction chimique de l'HCl avec la chaux libérée de l'hydratation du ciment, produit du chlorure de calcium (CaCl_2), qui est un sel très soluble et très nocif pour le béton.

La perte en masse dans le milieu d'acide sulfurique H_2SO_4 est supérieure comparativement à celle de HCl. Les pertes de masse après 180 jours d'attaque sont respectivement 19.59%, 17.65%, 26.74% et 25.41% dans les formulations BS8, BS12, BS13 et BS15. L'acide sulfurique H_2SO_4 est très agressif par son acidité et l'ions (SO_4^{2-}) qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite retardée.

**CONCLUSIONS GENERALES
ET PERSPECTIVES**

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Notre thèse donne une contribution importante qui se fait partie de plusieurs travaux de recherche visant à valoriser les sables locaux dans le secteur de construction en Algérie. L'objectif du présent travail était de formuler un béton de sable à haut performance (BSHP), d'appréhender les rôles joués par ses différents constituants sur les propriétés physico-mécaniques à l'état frais et durci.

Aussi, l'étude de l'effet de la substitution partielle d'une masse de ciment par les additifs minéraux fumée de silice (FS) et laitier haute fourneaux (LHF) sur les propriétés physico-mécaniques du BSHP en utilisant l'approche des plans de mélange a été réalisé.

Les résultats obtenus montrent une excellente convergence entre les modèles expérimentaux et mathématiques et également démontrent la robustesse et l'utilité de l'approche de plan de mélange. Cette approche a permis de visualiser l'effet (FS) et (LHF) sur les caractéristiques du (BSHP).

Les coefficients de corrélation obtenues par l'étude des échantillons de béton de sable à l'aide des modèles mathématiques développés présentent des excellentes valeurs pour l'affaissement, la résistance à flexion et la résistance à la compression ($R^2=0.96$ pour CS7, $R^2=0.93$ pour CS28, $R^2=0.95$ pour l'affaissement et $R^2=0.93$ pour Ft28).

L'effet de dosage en ciment est le plus important sur la résistance du BSHP, ceci est le résultat du coefficient de ciment qui prend la plus grande valeur dans les modèles de la résistance mécanique.

Notre modèle mathématique développé nous a permis de formuler un BSHP (mélange binaire) avec une résistance à la compression qui atteinte 60 MPa, en 28 jours, en remplaçant 10 % du poids de ciment par FS.

La résistance à la compression de 58 MPa peut également être atteinte dans les mélanges ternaires, en utilisant deux additifs : FS (10%) et LHF (5%) par remplacement partiel du poids de ciment (15%).

Selon le modèle mathématique qui exprime l'affaissement, les valeurs des coefficients de FS et LHF sont estimées respectivement 40.21 % et 146.71 % de celui du ciment, alors contrairement au FS le LHF améliore la maniabilité du béton BSHP.

L'analyse des résultats des essais de sorptivité à l'âge de 28 jours et la durabilité du BSHP dans trois milieux de conservation différents : l'eau douce, 5% HCl et 5% H₂SO₄ pendant 180 jours, permis de conclure que :

La substitution du ciment par 10% de FS a diminué la sorptivité de 40%, la relation entre la sorptivité et la résistance à la compression à 28 jours est inverse (plus le coefficient de sorptivité est grand la résistance à la compression est diminuée).

Après 180 jours d'immersion dans d'eau, les deux bétons de sable BS8 et BS12 ayant le moins gain de masse. La perte de masse de béton BS8 et le BS12 est de 9.28% et 8.53% respectivement après 180 jours de conservation dans l'acide chlorhydrique HCl, c'est à dire le BS8 et le BS12 représentent une bonne résistance à l'attaque chimique par l'HCl par rapport les autres bétons. La réaction chimique de l'HCl avec la chaux libérée de l'hydratation du ciment, produit du chlorure de calcium (CaCl_2), qui est un sel très soluble et très nocif pour le béton.

La perte en masse dans le milieu d'acide sulfurique H_2SO_4 est supérieure comparativement à celle de HCl. Les pertes de masse après 180 jours d'attaque sont respectivement 19.59%, 17.65%, 26.74% et 25.41% dans les formulations BS8, BS12, BS13 et BS15. L'acide sulfurique H_2SO_4 est très agressif par son acidité et l'ions (SO_4^{2-}) qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite retardée.

Et comme perspectives de notre travail :

- Une étude plus approfondie des caractéristiques microscopiques MEB de BSHP est recommandée.
- De même, il convient d'étudier d'autres propriétés de durabilité du BSHP, telles que la résistance à la corrosion, la réaction alcalino-agrégat, ainsi que le gel et le dégel.
- Faire un traitement thermique pour accélérer la réaction lente de LHF.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Sablocrete, *Bétons de sable*, *Projet national de recherche-développement*. France, Paris : Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 1994.
- [2] K. I. L'vovich, "The sand concrete is a Russian construction material for the XXI century.," *Constr. Mater. Equip. Technol. XXI Century, Russ.* 61(2), pp. 16-19., 2004.
- [3] S. Melais, M. F. Bouali, A. Melaikia, and A. Amirat, "Effects of coarse sand dosage on the physic-mechanical behavior of sand concrete," *Frat. ed Integrità Strutt. ed Integrità Strutt.*, vol. 15, no. 56, pp. 151–159, 2021.
- [4] A. Rmili, M. Ben Oueddou, M. Added, and E. Ghorbel, "Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part II: SCC Fresh and Hardened States Characteristics," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 11–14, 2009.
- [5] M. Mani, M. F. Bouali, A. Kriker, and A. Hima, "Experimental characterization of a new sustainable sand concrete in an aggressive environment," *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 15, no. 55, pp. 50–64, 2021.
- [6] CNERIB, "Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment, " Bétons de Sable ", Rapport de recherches. Tipaza, Algérie," 1992.
- [7] B. Tayeb, "Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant," Bougara-boumerdes, Université M Hamed Hamid, Yousfi, 2012.
- [8] "Monde Désertique Carte | Désertique Carte De Monde," 2012. [Online]. Available: <https://fr.mapsofworld.com/world-desert-map.htm>.
- [9] AFNOR NF P 18-500, "Béton de sable," no. 1, pp. 1–12, 1995.
- [10] AFNOR NF XP P18-540, "Granulats," vol. 33, no. 0, pp. 383–384, 2011.
- [11] A. ZRI, "Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dr agage : application aux bétons de sables et granulats," lille, 2010.
- [12] AFNOR NF P15-301, "Liants hydrauliques Ciments courants Composition," no. 1, pp. 1–25, 1994.
- [13] AFNOR NF P98-170, "Chaussees en beton de ciment Execution et controle," 1992.
- [14] AFNOR NF EN 934-2/A2, "Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour béton - Définitions et exigences," *Afnor*, vol. 33, no. 0, 2006.
- [15] S. H. Kosmatka and M. L. Wilson, *Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 15th edition*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2011, 460 pages. United States of America, 2011.

-
- [16] D. Benamara, "Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP)," Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider –Biskra (Algérie), 2011.
- [17] R. Salima, "Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux.," Mémoire magister, Université Mohamed Khider –Biskra (Algérie), 2012.
- [18] Teralta, "béton coloré." [Online]. Available: <https://blog.teralta-audemard.com/hubfs/2.Vincendo Particulier - PHOTOS Blog/prix-beton-colore-reunion-artisan.jpg>.
- [19] Y. Saadia, "Recherche d'une methode universelle de formulation de beton par une etude stochastique correlative," Thèse de doctorat, universite des sciences et de la technologie houari boumedene, 2014.
- [20] I. BENAÏSSA, "béton de sable fibré projeté pour panneau 3d," Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf-Oran (Algérie), 2015.
- [21] P. SERNA ROS, "Étude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement," Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées (France), 1984.
- [22] D. Benamara and L. Zeghichi, "Béton De Sable Haute Performance : Formulation , Et Durabilité," *Ann. du bâtiment des Trav. publics*, 2015.
- [23] O. Jaradat, K. Gadri, and A. Guettala, "Study the mechanical and physical properties of sand concrete using crushed limestone sand," *J. Mater. Electron. Devices*, vol. 3, no. 1, pp. 26–29, 2021.
- [24] M. S. Ammari, M. B. Tobchi, Y. Amrani, A. Mim, M. Bederina, and A. A. Ferhat, "Influence of glass powder incorporation on the physical-mechanical properties of sand concrete," *World J. Eng.*, 2021.
- [25] B. Achoura, D. Redjel, "Amélioration de la qualité des bétons de sable par incorporation de fillers de laitier granulé d'El-Hadjar," in *Le 4eme Symposium International sur la Construction, Chlef, Algeria.*, 2005.
- [26] K. Gadri and A. Guettala, "Étude du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de déchets de polissage de carrelage Résumé ;," *Noûs*, pp. 1–6, 2013.
- [27] I. K. Cisse, M. Laquerbe, A. Gaye, and M. Diene, "Caractérisation des bétons de sable routiers compactés: application au cas du Sénégal," *Mater. Struct.*, vol. 32, no. 2, pp. 151–157, 1999.
- [28] G. W. Neji J, Smaoui H, "Proposal of new materials for road foundation: a Saharan sand treated with slag and a compacted sand concrete," *Int J Pavements*, vol. 5, no. 1, 2006.
-

-
- [29] S. El Euch, R. Ben Othman, and J. Neji, "Béton de sable de dragage fibre," no. February, 2020.
- [30] B. Felekoğlu, K. Tosun, and B. Baradan, "Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 1023–1032, 2009.
- [31] M. Orouji, S. M. Zahrai, and E. Najaf, "Effect of glass powder & polypropylene fibers on compressive and flexural strengths, toughness and ductility of concrete: An environmental approach," *Structures*, vol. 33, no. January, pp. 4616–4628, 2021.
- [32] M. Hadjoudja, R. Benzaid, H. A. Mesbah, Z. Makhloufi, and M. Bederina, "Effect of Mineral Additions and Metal Fibers on the Resistance of Cracking of the Dune Sand Concretes," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 45, no. 3, pp. 1523–1537, 2021.
- [33] D. Benamara, N. Tebbal, and Z. E. A. Rahmouni, "Durability of high performance sandcretes (HPS) in aggressive environment," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 8, no. 3, pp. 199–206, Nov. 2019.
- [34] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M. M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 3, pp. 662–668, 2007.
- [35] M. Bederina, B. Laidoudi, A. Goullieux, M. M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, "Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1311–1315, 2009.
- [36] N. Tebbal and Z. E. A. Rahmouni, "Influence of Local Sand on the Physicomechanical Comportment and Durability of High Performance Concrete," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2016, 2016.
- [37] M. Behim, B. Redjel, and R. Jauberthie, "Réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment," *J. Phys. IV JP*, vol. 12, no. 6, pp. 223–228, 2002.
- [38] R. Zaitri, M. Bederina, T. Bouziani, Z. Makhloufi, and M. Hadjoudja, "Development of high performances concrete based on the addition of grinded dune sand and limestone rock using the mixture design modelling approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 60, pp. 8–16, Jun. 2014.
- [39] T. Hadji, S. Guettala, and M. Quéneudec, "Mix design of high performance concrete with different mineral additions," *World J. Eng.*, vol. 18, no. 5, pp. 767–779, Apr. 2021.
- [40] A. Attia, S. Guettala, and R. Zaitri, "Using mixture design method to optimizing concretes characteristics made with binary and ternary sands," *World J. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 194–
-

- 205, Jan. 2021.
- [41] S. M. Zahrai, M. H. Mortezaghali, and E. Najaf, "Using AP2RC & P1RB micro-silica gels to improve concrete strength and study of resulting contamination," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 4, no. 3, pp. 195–206, Sep. 2016.
- [42] P. Matar and J. J. Assaad, "Concurrent effects of recycled aggregates and polypropylene fibers on workability and key strength properties of self-consolidating concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 199, pp. 492–500, 2019.
- [43] A. Benaïssa, "Déformations différées du béton de sable, Thèse de doctorat de génie civil," Université de Bordeaux I, 1992.
- [44] P. Balayssac, C. Detriche, and J. Grandet, "Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage," *Mater. Struct.*, pp. 226–230, 1993.
- [45] G. Chanvillard and O. Basuyaux, "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées," *Bull. des Lab. des Ponts Chaussées*, vol. 0, no. 205, pp. 49–63, 1996.
- [46] J. Goupy and L. Creighton, *Introduction aux plans d'expériences*, 3rd ed. France: Liusine nouvelle, 2006.
- [47] C. Simard, M.-A. Nadeau, and A. Turcotte, *Notions de statistique*. Modulo, France, 2015.
- [48] S. Karam, "Application de la méthodologie des Plans d'expériences et de l'Analyse de données à l'Optimisation des Processus de Dépôt," *Univ. Limoges*, vol. 39, p. 204, 2004.
- [49] A. Ghrieb, "Contribution à l'étude d'un béton de sable de dunes," Mémoire magister, Ecole Nationale Polytechnique-Alger (Algérie), 2003.
- [50] P. DELUDE, "Etude de béton de sable," *CETE de Bordeaux, France.*, 1984.
- [51] R. GUINEZ, G. GLUAIS.P, and D. Al, "Les bétons de sable," *ministre de l'urbanisation et du logement*, laboratoires régionaux de Blois et de Bordeaux, France., 1984.
- [52] J. J. CHAUVIN, "Bétons spéciaux : Les bétons de sable," , *LRPC, Bordeaux, Fr.*, 1987.
- [53] NSAI, "Methods of testing cement Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement," *South African Natl. Stand.*, 2011.
- [54] AFNOR NF P18-560, "Granulats, Analyse granulométrique par tamisage," no. 1, pp. 1–9, 1992.
- [55] BS:EN:1008:2002, "Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete," *BSI Stand. Publ.*, vol. 3, no. December, p. 22, 2002.
- [56] AFNOR NF P18-452, "Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre." p. 11, 2017.

-
- [57] AFNOR NF EN 12350-2, *European standard Testing fresh concrete – part 2: slump test, P18-431-2*, AFNOR. 2012.
- [58] AFNOR NF EN 12390-3, “European standard Testing hardened concrete - Part 3: compressive strength of test specimens,” 2019.
- [59] AFNOR NF P18-407, *Bétons, Essai de traction par flexion*. 1981.
- [60] Steven H. Kosmatka, B. Kerkhoff, and W. C. Panarese, *Design and Control of Concrete Mixtures*, no. 54048. USA: Portland Cement Association, 2011.
- [61] T. C. Holland, *Silica fume user’s manual*. Washington: Federal Highway Administration, 2005.
- [62] P. Pinsonneault, “Influence des fumées de silice sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons et des mortiers,” Thèse de l’Université de Sherbrooke, Quebec (Canada), 1983.
- [63] I. C. Ployaert, “Durabilité des bétons par la maîtrise de l’absorption d’eau,” *Febelcem*, p. 16, 2009.
- [64] K. Samimi, “Contribution à l’étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs : effets des pouzzolanes naturelles,” Thèse de doctorat, INSA de Rennes (France), 2016.
- [65] H. Janfeshan Araghi, I. M. Nikbin, S. Rahimi Reskati, E. Rahmani, and H. Allahyari, “An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 461–471, 2015.
- [66] H. Siad, H. A. Mesbah, H. Khelafi, S. Kamali-Bernard, and M. Mouli, “Effect of mineral admixture on resistance to sulphuric and hydrochloric acid attacks in selfcompacting concrete,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 441–449, 2010.
- [67] Y. Senhadji, G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi, and Benosman, “Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar,” *Powder Technol.*, vol. 254, pp. 314–323, 2014.
- [68] W. Deboucha, N. Leklou, K. Abdelhafid, and A. Pertue, “L’effet du laitier de haut fourneau sur la porosité du mortier,” *AJCE*, vol. 35, no. 1, pp. 190–193, 2020.
- [69] B. Salesses, “Durabilité des matrices ciment Portland - laitier de haut-fourneau activées par des chlorures,” Université Paul Sabatier - Toulouse III (France), 2019.
- [70] M. Ghrici, S. Kenai, and M. Said-Mansour, “Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 7, pp. 542–549, 2007.
- [71] T. Douara, “Effets des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable,” Thèse de
-

- doctorat, Université Mohamed Khider –Biskra (Algérie), 2019.
- [72] H. Y. Leung, J. Kim, A. Nadeem, J. Jaganathan, and M. P. Anwar, “Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 369–375, Jun. 2016.
- [73] M. Cherrak, A. Bali, and K. Silhadi, “Concrete mix design containing calcareous tuffs as a partial sand substitution,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 318–323, 2013.
- [74] A. H. M. Belhadj, A. Mahi, and R. Derbal, “Evaluation de La Durabilité du Béton Pouzzolanique Fibré dans des Milieux Acides,” *24ème Congrès Français de Mécanique*, 2019.

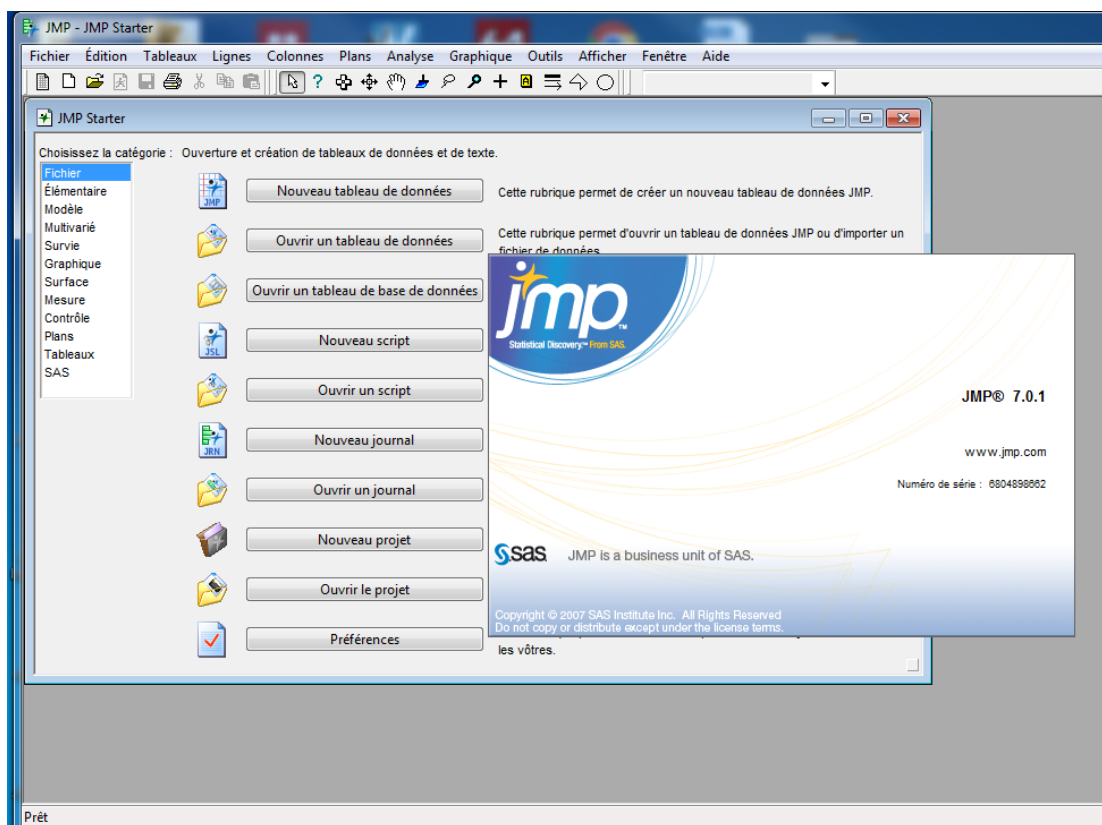
ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE 01

TRAITEMENT DE PROBLÈMES DE MÉLANGE AVEC JMP7

Page d'accueil du logiciel JMP7



❖ Choisir le plan

JMP vous propose plusieurs plans. Ici, choisissez le cinquième plan (**Plans de mélanges**).

❖ Entrer les réponses

Sélectionnez **Plans > Plans de mélanges**. Lorsque la boîte de dialogue apparaît, double-cliquez sur le nom de la réponse, Y, et entrez **CS 28 Days (résistance à la compression à 28 jours)**.

❖ Entrer les facteurs

Dans la rubrique « **Facteurs** », entrez le chiffre 3 (nombre de facteurs) devant « **Continuer** » et cliquez sur le bouton « **Ajouter** » pour introduire deux facteurs.

❖ Modifier le nom des facteurs

Double-cliquez sur 'X1' et modifiez-le en le remplaçant par '**Cement**'. Répétez cette opération pour 'X2' et 'X3' en les remplaçant par '**SF**' et '**BFS**' respectivement. Cliquez sur le bouton « **Continuer** » pour passer à la rubrique suivante.

Plans- Plans de mélanges

Plans de mélanges

Réponses

Ajouter une réponse ▼ Supprimer Nombre de réponses...

Nom de la réponse	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance
Y	Maximiser	.	.	.

élément facultatif

Facteurs

Ajouter 1 Mélange

Supprimer la sélection

Nom	Rôle	Valeurs	
X1	Mélange	0	1
X2	Mélange	0	1
X3	Mélange	0	1

Plans de mélanges

Spécification des facteurs

Spécifiez le nombre de facteurs souhaité. Double-cliquez sur le nom d'un facteur ou sur ses limites pour les modifier.

Continuer

Plans- Plans de mélanges

Plans de mélanges

Réponses

Ajouter une réponse ▼ Supprimer Nombre de réponses...

Nom de la réponse	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance
SC28 Days	Maximiser	.	.	.

élément facultatif

Facteurs

Ajouter 1 Mélange

Supprimer la sélection

Nom	Rôle	Valeurs	
cement	Mélange	0	1
SF	Mélange	0	1
BFS	Mélange	0	1

Plans de mélanges

Spécification des facteurs

Spécifiez le nombre de facteurs souhaité. Double-cliquez sur le nom d'un facteur ou sur ses limites pour les modifier.

Continuer

Plans- Plans de mélanges

Plans de mélanges

Réponses

Ajouter une réponse ▼ Supprimer Nombre de réponses...

Nom de la réponse	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance
SC28 Days	Maximiser	.	.	.

élément facultatif

Facteurs

Nom	Rôle	Valeurs	
cement	Mélange	0	1
SF	Mélange	0	1
BFS	Mélange	0	1

Plans de mélanges

3 Facteurs

Choisissez un type de plan de mélanges.

Optimal Cette rubrique permet de créer un plan conçu pour répondre à des exigences particulières : diminuer le nombre des essais des plans classiques, adapter le plan aux contraintes expérimentales, proposer un plan pour un nombre d'essais donnés, réparer des plans mal conçus, diminuer le nombre d'essais des plans contenant des facteurs de mélanges et des facteurs de processus, etc.

Plan de mélange centroïde Plan composé des constituants purs et des mélanges à K constituants en proportions égales. **K** 2

Plan de mélange en réseau Plan composé des K constituants purs et de leurs mélanges en proportion m/N (m variant de 1 à N). Veuillez spécifier le nombre de niveaux par facteur. **Nombre de niveaux** 4

Plan de mélanges aux sommets extrêmes Les points de mélanges sont situés aux sommets du simplex, au milieu des arêtes et au centre du simplex. **Degré** 2

Contrainte linéaire Ajoutez des contraintes linéaires aux proportions relatives de constituants. Cliquez une fois pour chaque contrainte.

Plan ABCD Un plan de mélanges pour le criblage des facteurs.

- ❖ Vous devez maintenant sélectionner l'ordre des essais. « **Randomiser** » est le choix par défaut. Ici, choisissez « **Garder le même ordre ou Trier de gauche à droite** ».

Plans de mélanges

Facteurs

Nom	Rôle	Valeurs	
cement	Mélange	0	1
SF	Mélange	0	1
BFS	Mélange	0	1

Plans de mélanges
3 Facteurs

Opérations sur les facteurs

Numéro des essais	cement	SF	BFS
1	0.00000	0.00000	1.00000
2	0.00000	0.25000	0.75000
3	0.00000	0.50000	0.50000
4	0.00000	0.75000	0.25000
5	0.00000	1.00000	0.00000
6	0.25000	0.00000	0.75000
7	0.25000	0.25000	0.50000
8	0.25000	0.50000	0.25000
9	0.25000	0.75000	0.00000
10	0.50000	0.00000	0.50000
11	0.50000	0.25000	0.25000
12	0.50000	0.50000	0.00000
13	0.75000	0.00000	0.25000
14	0.75000	0.25000	0.00000
15	1.00000	0.00000	0.00000

Afficher et modifier le plan

Options de sortie

Ordre des essais :

Construire le tableau JMP depuis Design Plus

Nombre de répétitions :

❖ Construire le plan

Cliquez sur le bouton « **Construire le tableau JMP** » pour générer votre plan sous la forme d'un tableau : les facteurs sont en colonnes et les résultats d'essais (réponses) en lignes. La colonne des réponses sera remplie après l'exécution des expériences pour pouvoir effectuer l'analyse des résultats.

Plan de mélange en réseau

Plan de mélange en rés

Plans Plan de mélange en

Modèle

Colonnes (4/0)

cement *
SF *
BFS *
SC28 Days *

Lignes

Toutes les lignes 15
Sélectionnée(s) 0
Exclue(s) 0
Masquée(s) 0
Étiquetée(s) 0

	cement	SF	BFS	SC28 Days	
1	0	0	1		•
2	0	0.25	0.75		•
3	0	0.5	0.5		•
4	0	0.75	0.25		•
5	0	1	0		•
6	0.25	0	0.75		•
7	0.25	0.25	0.5		•
8	0.25	0.5	0.25		•
9	0.25	0.75	0		•
10	0.5	0	0.5		•
11	0.5	0.25	0.25		•
12	0.5	0.5	0		•
13	0.75	0	0.25		•
14	0.75	0.25	0		•
15	1	0	0		•

Plan de mélange en réseau

Plan de mélange en rés

Plans Plan de mélange en

Modèle

Colonnes (4/1)

cement *
SF *
BFS *
SC28 Days *

Lignes

Toutes les lignes 15
Sélectionnée(s) 1
Exclue(s) 0
Masquée(s) 0
Étiquetée(s) 0

	cement	SF	BFS	SC28 Days	
1	0	0	1	35.87	
2	0	0.25	0.75	47.85	
3	0	0.5	0.5	50.32	
4	0	0.75	0.25	46.32	
5	0	1	0	41.92	
6	0.25	0	0.75	40.47	
7	0.25	0.25	0.5	50.93	
8	0.25	0.5	0.25	57.8	
9	0.25	0.75	0	49.45	
10	0.5	0	0.5	42.63	
11	0.5	0.25	0.25	50.39	
12	0.5	0.5	0	60.89	
13	0.75	0	0.25	43.54	
14	0.75	0.25	0	56.23	
15	1	0	0	43.94	

❖ Analyse d'un plan de mélanges

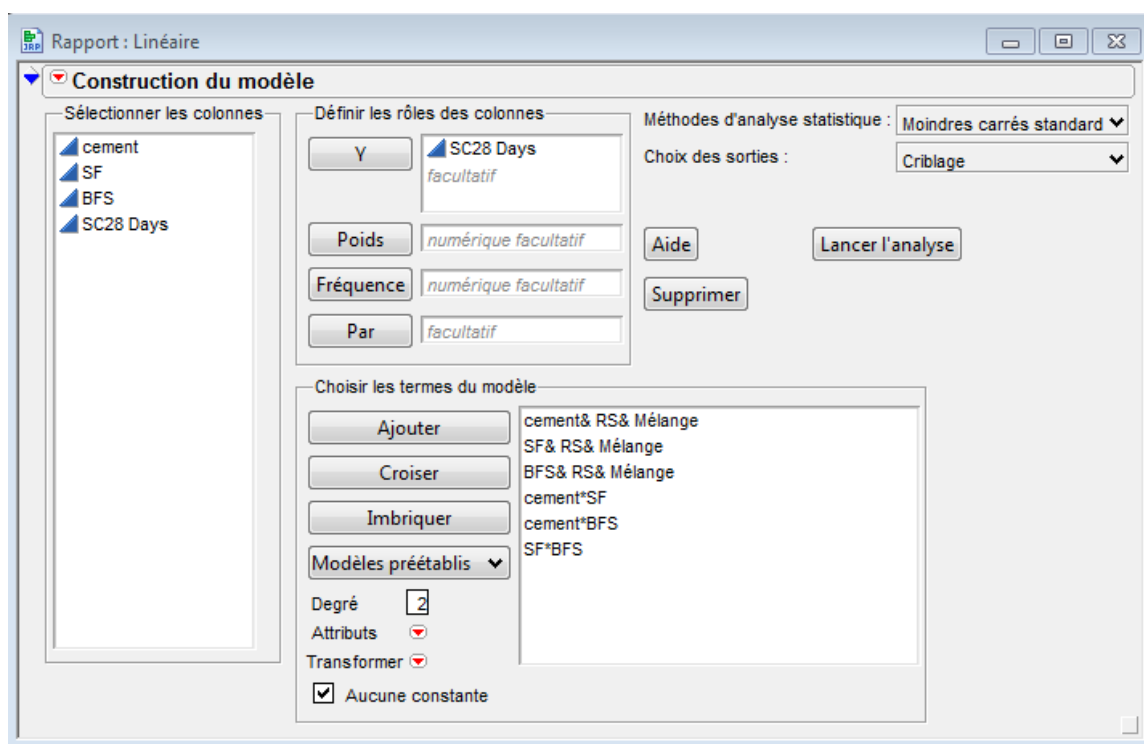
Un script appelé « **Modèle** » a été enregistré dans le panneau supérieur gauche du tableau de données. Ce script contient le modèle du plan qui a été créé pour l'estimation.

Cliquez sur le hot spot situé à côté de '**Modèle**', puis sélectionnez « **Exécuter le script** ».

Une nouvelle fenêtre « **Construction du modèle** » apparaît. Un modèle est proposé et prêt à être exécuté.

Vous avez maintenant le choix entre accepter le modèle et l'exécuter tel quel, ou le modifier avant de l'exécuter.

Cliquez sur le bouton « **Lancer l'analyse** » dans la fenêtre « **Construction du modèle** ».



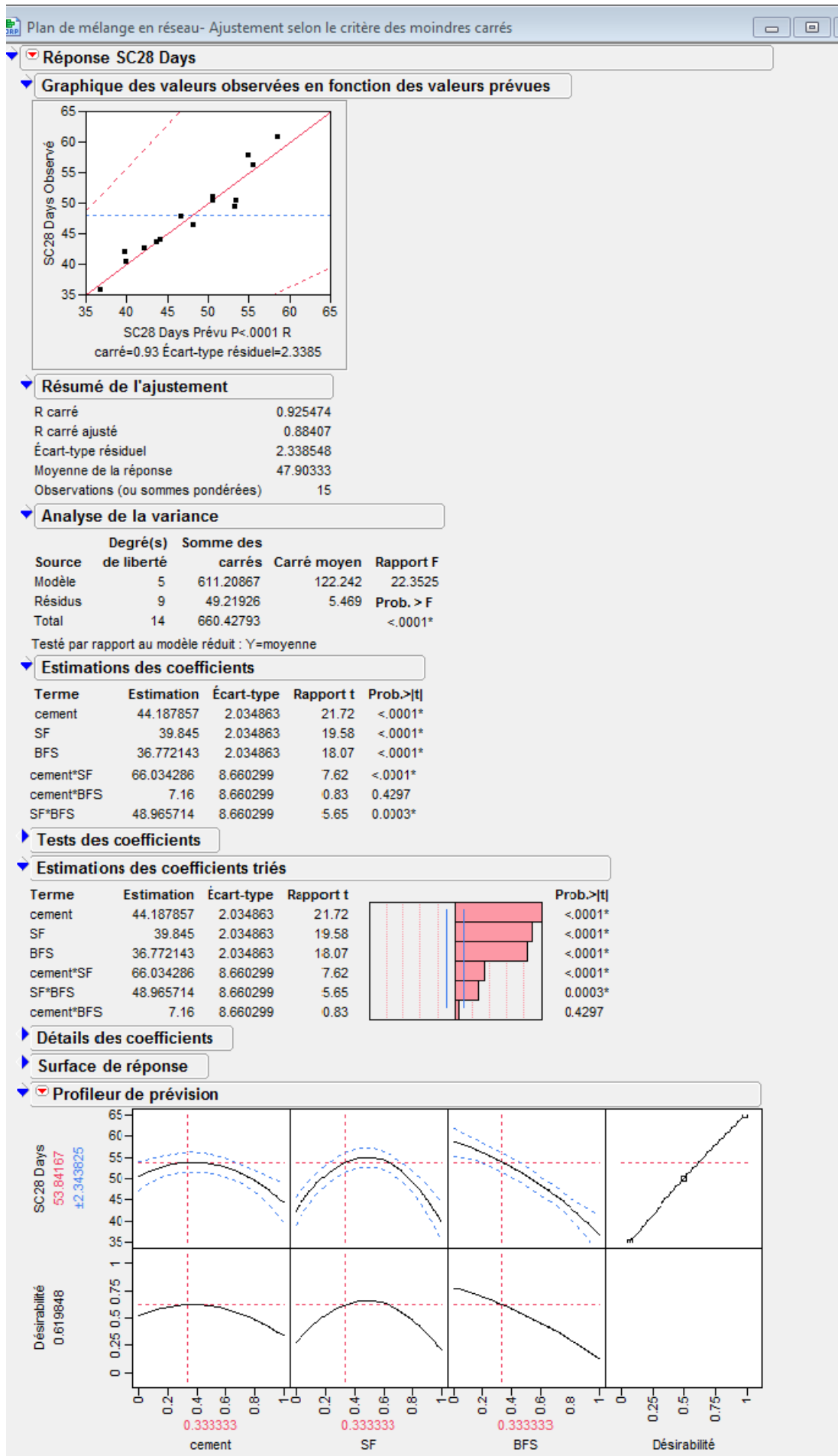
❖ Résultats de l'analyse

Le rapport estimations des coefficients est idéal pour vérifier la valeur des coefficients du modèle et leurs significativités statistiques.

Le Profileur de prévision situé en bas permet d'analyser la surface de réponse.

Les paramètres de réponse par défaut supposent que vous souhaitez maximiser la réponse. Ils figurent dans les paramètres de Désirabilité.

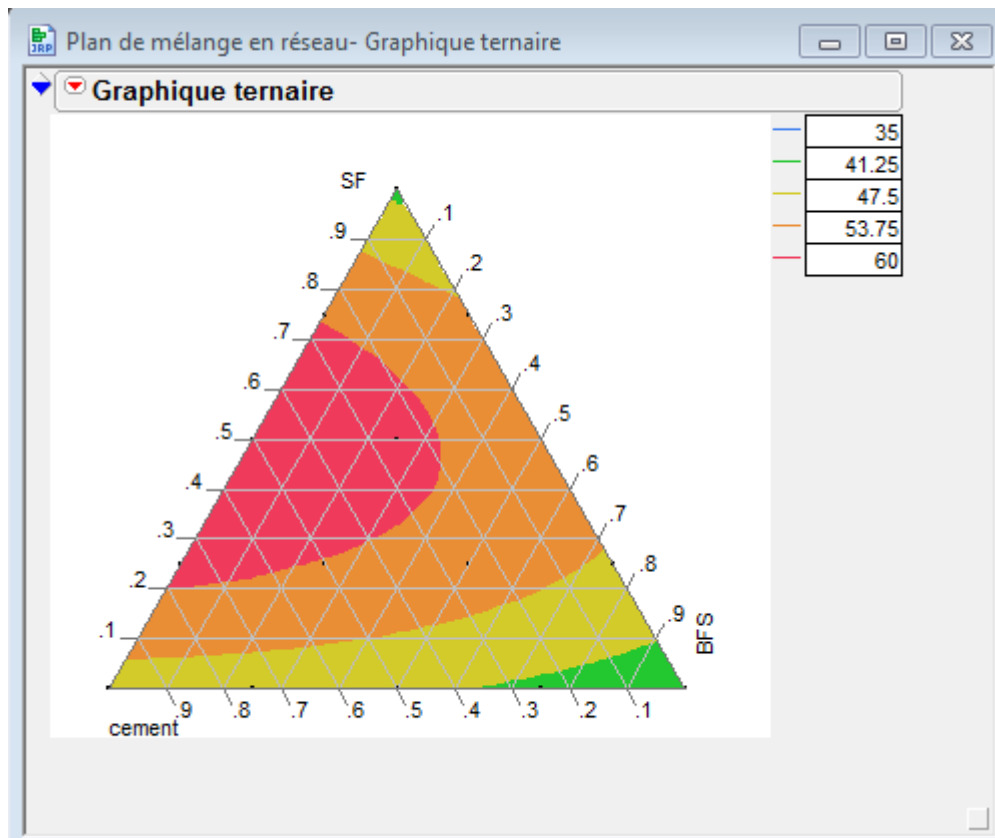
Cliquez sur le hot spot dans « **Profileur de prévision** », puis choisissez « **Maximiser la désirabilité** ». Ce profileur trouve les niveaux des facteurs qui maximisent le rendement prévu.



❖ Dessin des surfaces de réponses

Sauver les formules de prédiction des réponses à partir de la fenêtre des résultats du modèle. Utiliser ensuite l'option « **Graphique Ternaire** ». A ce stade il semble y avoir un bug qui empêche de dessiner les courbes directement du fait que le modèle comprend une variable quantitative.

Voici après quelques manipulations : la courbe iso-réponse de la résistance de la compression à 28 jours.



ANNEXE 02

FICHE TECHNIQUE DU SUPERPLASTIFIANT

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

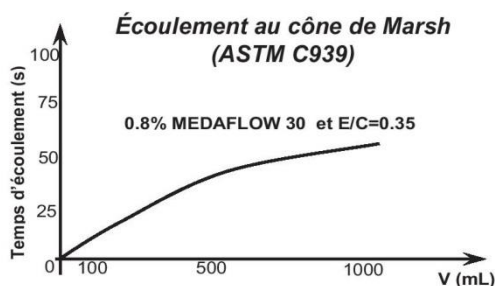
DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

58

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



59

ANNEXE 03

FICHE TECHNIQUE DU FUMÉE DE SILICE

NOTICE TECHNIQUE

Version 03

Edition février 2017

2

1

3

3

MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice**Description**

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

Propriétés :

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST HP** permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la cohésion
- Éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
 - Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
 - Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
 - Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
 - Augmenter la durabilité du béton
- L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (**MEDAPLAST SP, SP40**) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

Caractéristiques :

- Aspect Poudre
- Densité 0,5
- Densité absolu 2.3 ± 0.1
- Composants :
 - SiO₂ > 85(%)
 - SO₃ < 2,5 (%)
 - Cl- < 0,2 (%)
- Surface spécifique > 15 (m²/gr)
- Humidité par étuve à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

Mode D'emploi

Le **MEDAPLAST HP** est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (**MEDACURE**) surtout par temps chaud ou en présence de vents.

Dosage :

Le dosage du **MEDAPLAST HP** varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

Conditionnement Et Stockage :

Le **MEDAPLAST HP** est conditionné en sacs de 2 kg et 25 kg. Disponible aussi en Big bag.

Durée de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

Précaution D'emplois

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Grani
فرانتيكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

