

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE AMMAR THLIDJI - LAGHOUAT

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté par

MEDDAH OUMKELTOUM

En vue de l'obtention du diplôme Master en génie civil

Option : Matériaux de construction

Titre

**ETUDE DE L'EFFET DES AJOUTS MINERAUX SUR LE
COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS DE SABLE**

Soutenu devant le jury :

Mr. ZIREG Ahmed	M.A.A	Président
Dr. DJOUDJ Amina	M.C.B.	Examinatrice
Dr .HADJOUDDJA Mourad	M.C.B.	Encadreur
Dr. MAKHLOUFI Zoubir	M.C.A.	Co-encadreur

Année d'étude : 2015/ 2016

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mes professeurs, Mr Mourad Hadjoudja et Mr Zoubir Makhloufi pour, m'avoir encouragé à faire cette recherche. Merci infiniment pour les orientations déterminantes, les conseils, les critiques et la confiance qu'ils m'ont témoignée. J'avoue que je me trouve dans l'impossibilité de trouver les mots pour exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, le Docteur Mourad Hadjoudja qui m'a aidé, conseillé et dirigé au cours de ma mémoire, ainsi que pour son apport moral et scientifique pendant la réalisation de ce travail ; Je contracte envers lui une dette dont j'ignore comment m'acquitter.

Je remercie vivement Docteur Zireg Ahmed, de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury. Je tiens également à adresser mes sincères remerciements au Docteur Djoudi Amina qui m'a honoré en acceptant d'être examinatrice dans ce jury.

En fin que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ma formation, trouvent ici ma gratitude et mes remerciements.

A bouquet of yellow lilies with green stems and leaves is positioned on the left side of the image. The background is a white lace fabric with a repeating geometric pattern. The text is written in a cursive script on the right side of the image.

A la mémoire de mon Père

A ma Mère

A Faiz mon ange gardien

A mon Mari et mes Enfants

A mes Sœurs et Frères

A tous mes Amis

Oum Keltoum

Table des matières

REMERCIEMENT

RESUMEI

TABLE DES MATIERESIV

TABLE DES ILLUSTRATIONSIX

LISTE DES FIGURESIX

LISTE DES TABLEAUXXV

NOTATIONSXVI

INTRODUCTION GENERALE1

Chapitre 1 - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

BETON DE SABLE..... 4

Introduction 4

I-1 Historique du béton de sable 4

I.2 Caractéristiques générales des bétons de sable 9

I.2.1 Qu'est-ce que le béton de sable ?..... 9

I.2.2 Composants du béton de sable 10

I.2.2.1 Sables 10

I.2.2.2 Ciments 11

I.2.2 .3 Additions 11

I.2.2 .4 Autres ajouts 14

I.2.3 Propriétés générales des bétons de sable 15

I.2.4 Caractéristiques spécifiques des bétons de sable 18

I.3 Méthodes de formulation d'un béton de sable 20

I.3 1 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable 20

I.3.1.1 Dosage en fines d'un béton de sable 21

I.3.1.2 Dosage en eau d'un béton de sable..... 22

I.3.1.3 Dosage en sable..... 24

I.3.1.4 Estimation de la résistance en compression..... 25

I.3.2 Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable 28

I.3.2.1 Présentation générale de la méthode expérimentale 28

I.3.2.2 Différentes étapes de la formulation 28

I.3.2.3. Détermination du dosage en fines d'addition 30

I.3.2.4. Evaluation de la résistance 31

I.4 Avantages et limite d'emploi des bétons de sable	31
I.4.1 Avantages des bétons de sable	31
I.4.1.1 Ouvrabilité	31
I.4.1.2 Qualité d'aspect	31
I.4.1.3 Homogénéité-Cohésion.....	32
I.4.1.4 Applications privilégiées	32
I.4.2 Limites d'emploi des bétons de sable	33
I.4.2.1 Raisons économiques.....	33
I.4.2.2 Raisons techniques.....	33
CONCLUSIONS	34

Chapitre 2 - CARACTERISTION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction	35
II.2. Caractérisation des matériaux.....	35
II.2. 1. Sable	35
Caractéristiques physiques	35
a) Analyses granulométriques	35
b) Module de finesse	35
c) Equivalent de sable	37
d) Masses volumiques	38
Compositions minéralogiques (DRX).....	39
Analyses chimiques.....	39
II. 2.2 Ciment	41
Caractéristiques physiques	41
Compositions minéralogiques (DRX).....	41
Caractéristiques mécaniques	42
II.2.3 Ajouts minéraux	42
II.2.3.1 Filler calcaire	43
Caractéristiques physiques	43
Analyse granulométrique	43
Compositions minéralogiques (DRX).....	43
Analyses chimiques.....	44
II.2.3.2 Laitier de haut fourneau.....	45
Caractéristiques physiques	45

Analyses chimiques.....	46
II.2.4 Super plastifiant.....	47
II.2.5 Eau de gâchage	47
II.3 METHODES D’ESSAIS	48
II.3.1 Essais effectués sur béton frais	48
II.3.1.1 Affaissement au cône d’ABRAMS	48
II.3.1.2 Teneur en air occlus du béton.....	49
II.3.1.3 Masse volumique du béton frais	50
II.4 Confection des éprouvettes et conditions de conservation.....	51
II.4.1 Malaxage	52
II.4.2 Vibration.....	52
II.4.3 Arasement.....	54
II.4.4 Marquage	55
II.4.5 Conservation.....	55
II.5 Essais effectués sur béton durcis	56
II.5.1 Essais de compression simple.....	56
II.5.2 Essais de traction par flexion	57
II.5.3 Essais de Retrait	58
II.6 Méthode de plan d’expérience.....	58
II.6.1 Plans pour surfaces de réponse.....	59
II.6.2 Présentation des plans composites.....	59
Position des points en étoile	60
II.6.3 Organigramme du plan d’expériences	62
Chapitre 3 - DEVELOPPEMENT D'UN PLAN FACTORIEL POUR L’OPTIMISATION DU BSD	
III.1 Formulation des betons de sable	63
III.1.1 Introduction	63
III.1.2 Formulation de la composition centrale du plan	63
III.1.3 Objectif de la recherche.....	65
III.2. Preparation d’un plan d’expériences	65
III.2.1. Choix des facteurs modelises	66
III.2.2 Formulations utilisees pour etablir les modeles quadratiques.....	67
III.2.3 Presentation des resultats	68
III.2.4 Resultats des essais et discussions	70

III.2.4.1 Développement des modèles statistiques	75
III.2.4.2 Validité des modèles proposés	77
III.2.4.3 Modèles mathématiques	78
III.3 CONCLUSION	80

Chapitre 4 - INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES DE MELANGE SUR LES CARACTERISTIQUES DES BETONS DE SABLE

IV.1 Introduction	81
IV.2 Exploitation Des Modelés Développés	81
IV.2.1 Béton a l'état durci	82
IV.2.1.1 Résistances a la compression	82
IV.2.1.2 Résistances a la traction par flexion.....	86
IV.2.1.3 Retrait libre : RL	88
IV.2.1.4 Affaissement : Aff.....	90
IV.2.1.5 Masse volumique : MV	91
IV.2.1.6 Air occlus : A%.....	92
CONCLUSION GENERALE	94
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	96
ANNEXES	

Table des illustrations

I Liste des Tableaux

Tableau (I.1)	Compositions des bétons étudiés (à partir du sable de dune de Laghouat)	7
Tableau (I.2)	Résultats de résistance du béton 3(dans l'eau potable à $15^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$)	7
Tableau (I.3)	Résultats de résistances (E/C=0.7, 2.5% d'adjuvant)	8
Tableau (I.4)	Influence d'énergie de compactage sur la résistance	9
Tableau (II.1)	Résultats de l'analyse granulométrique des sables utilisés.	36
Tableau (II.2)	Résultats de l'équivalent de sable	38
Tableau (II.3)	Résultats de la compacité et la porosité.	39
Tableau (II.4)	Analyses chimiques des deux sables	40
	Propriétés physiques du ciment	41
Tableau (II.5)		
Tableau (II.6)	Analyses chimiques de ciment	42
Tableau (II.7)	Résistances mécaniques du ciment	42
Tableau (II.8)	Caractéristiques physiques du filler calcaire utilisé.	43
Tableau (II.9)	Caractéristiques chimiques du filler calcaire utilisé	44
Tableau (II.10)	Caractéristiques physiques du laitier utilisé	45
Tableau (II.11)	Caractéristiques chimiques du laitier utilisé	46
Tableau (II.12)	Propriétés du superplastifiant	47
Tableau (II.13)	Analyse chimique d'eau de gâchage	47
Tableau (II.14)	Puissance de serrage de béton en fonction de la plasticité	53
Tableau (II.15)	Valeur de α en fonction du nombre de points factoriels (nf), en étoile ($n\alpha$) et centraux ($n0$) pour le critère de presque-orthogonalité	61
Tableau (III.1)	Valeurs codées et absolues pour les facteurs étudiés	68

Tableau (III.2)	Variables codées des 17 mélanges utilisés	68
Tableau (III.3)	Proportions des 17 mélanges du béton de sable de dune	69
Tableau (III.4)	Proportions des mélanges et propriétés des 17 mélanges utilisés (à l'état frais)	71
Tableau (III.5)	Proportions des mélanges et propriétés des 17 mélanges utilisés (à l'état durci)	72
Tableau (III.6)	Paramètres estimés des différents modèles développées (linéaires et quadratiques)	74
Tableau (III.7)	Coefficients des modèles.	79
Tableau (IV.1)	Effet combiné du dosage en filler calcaire et du dosage en laitier à rapport SA/SD constant à 07 jours.	83
Tableau (IV.2)	Effet combiné du dosage en filler calcaire et du dosage en laitier à rapport SA/SD constant à 28 jours	84

II Liste des figures

Figure (I.1)	Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance	16
Figure (I.2)	Influence de la nature de l'addition sur la résistance	16
Figure (I.3)	Effet de la granularité sur la résistance des BS	17
Figure (I. 4)	Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation [	18
Figure (I.5)	Retrait d'auto-dessiccation Retrait total	19
Figure (I.6)	Fluage d'auto-dessiccation Fluage total	20
Figure (I.7)	Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines	22
Figure (I.8)	Influence de la dimension D sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable	23
Figure (I.9)	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée	24
Figure (I.10)	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)	26
Figure (I.11)	Organigramme de la méthode théorique	27
Figure (II.1)	Analyse granulométrique du sable de dune SD	36

Figure (II.2)	Analyse granulométrique du sable alluvionnaire SA	37
Figure (II.3)	Essai d'équivalent de sable.	37
Figure (II.4)	Diagrammes DRX des deux sables alluvionnaire et dunaire	39
Figure (II.5)	CEM II/B 42,5N (MATINE)	41
Figure (II.6)	Diffractogramme aux rayons X de ciment	41
Figure (II.7)	Analyse granulométrique du filler calcaire utilisé.	43
Figure (II.8)	Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires	44
Figure (II.9)	Courbe granulométrique de laitier	45
Figure (II.10)	Diffractogramme aux rayons X de laitier	46
Figure (II.11)	Affaissement au cône d'Abrams	48
Figure (II.12)	Aéromètre	50
Figure (II.13)	Mesure de la masse volumique du béton frais	51
Figure (II.14)	Confection de 09 éprouvettes cylindriques (pour écrasement) et 12 éprouvettes prismatiques dont 09 pour écrasement et 03 pour l'essai de retrait.	52
Figure (II.15)	Malaxage du béton	52
Figure (II.16)	Utilisation de la table vibrante pour les moules prismatiques	53
Figure (II.17)	Serrage par piquage (Affaissement > 9cm)	53
Figure (II.18)	Vibration par aiguille vibrante (affaissement	54
Figure (II.19)	Arasement des éprouvettes	55
Figure (II.20)	Exemple de marquage la combinaison N°14	55
Figure (II.21)	Conservation des éprouvettes dans des bacs galvanisés à une température maintenue constante à $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$.	56
Figure (II.22)	Essai de la compression	56
Figure (II.23)	Essai de la traction par flexion	57
Figure (II.24)	Mesures de retrait	58

Figure (II.25)	Plan composite pour l'étude de deux facteurs	60
Figure (II.26)	Organigramme du plan d'expériences	62
Figure (III.1)	Représentation des réponses en fonction des valeurs prédites par le modèle pour Rc7, Rc28, Rt7, Rt28, Ret7, Ret28, Aff, Mv et A%.	78
Figure (IV.1)	Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 07 jours d'âge de béton	82
Figure (IV.2)	Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours d'âge de béton	82
Figure (IV.3)	Développement de la résistance en compression dans le temps	85
Figure (IV.4)	Courbes iso-réponses de la résistance à la traction à 07 jours d'âge de béton	86
Figure (IV.5)	Courbes iso-réponses de la résistance à la traction à 28 jours d'âge de béton	86
Figure (IV.6)	Développement de la résistance à la traction dans le temps.	87
Figure (IV.7)	Courbes iso-réponses de retrait libre à 07 jours d'âge de béton	88
Figure (IV.8)	Courbes iso-réponses de retrait libre à 28 jours d'âge de béton	88
Figure (IV.9)	Evolution du retrait dans le temps	90
Figure (IV.10)	Courbes iso-réponses de l'affaissement des différents bétons	91
Figure (IV.11)	Courbes iso-réponses de la masse volumique des différents bétons	92
Figure (IV.12)	Courbes iso-réponses de l'air occlus des différents bétons	93

NOTATIONS

BO	Béton ordinaire
BS	Béton de sable
BSD	Béton de sable de dune
G/S	Rapport massique gravier/sable
E/C	Rapport massique eau/ciment
FC	Filler calcaire
LHF	Laitier des hauts fourneaux

LHF/C	Rapport massique laitier/ciment
S _p	Super-plastifiant
P _c	La charge à la rupture en compression
M _v	La masse volumique à l'état frais et durci
PSR	Plan de surface de réponses
PE	Plan d'expériences
P _f	La charge de rupture en flexion
R ²	Coefficient de corrélations
R _c	Résistance à la compression
R _{c7}	Résistance à la compression à 7 jours
R _{c28}	Résistance à la compression à 28 jours
R _t	Résistance à la traction par flexion
R _{t7}	Résistance à la traction par flexion à 7 jours
R _{t28}	Résistance à la traction par flexion à 28 jours
R _{et}	Retrait libre de séchage
R _{et7}	Retrait libre à 07 jours d'âge de béton
R _{et28}	Retrait libre à 28 jours d'âge de béton
A _{ff}	Affaïssement au cône d'Abrams
A	Teneur en air
SA/SD	Rapport massique de sable mélange (alluvionnaire-dunaire)

NOTATIONS

BO	Béton ordinaire
BS	Béton de sable
BSD	Béton de sable de dune
G/S	Rapport massique gravier/sable
E/C	Rapport massique eau/ciment
FC	Filler calcaire
LHF	Laitier des hauts fourneaux
LHF/C	Rapport massique laitier/ciment
S _p	Super-plastifiant
P _c	La charge à la rupture en compression
M _v	La masse volumique à l'état frais et durci
PSR	Plan de surface de réponses
PE	Plan d'expériences
P _f	La charge de rupture en flexion
R ²	Coefficient de corrélations
R _c	Résistance à la compression
R _{c7}	Résistance à la compression à 7 jours
R _{c28}	Résistance à la compression à 28 jours
R _t	Résistance à la traction par flexion
R _{t7}	Résistance à la traction par flexion à 7 jours
R _{t28}	Résistance à la traction par flexion à 28 jours
Ret	Retrait libre de séchage
Ret ₇	Retrait libre à 07 jours d'âge de béton
Ret ₂₈	Retrait libre à 28 jours d'âge de béton
A _{ff}	Affaissement au cône d'Abrams
A	Teneur en air
SA/SD	Rapport massique de sable mélange (alluvionnaire-dunaire)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. CONTEXTE

Aujourd'hui, le béton est le matériau le plus utilisé, dans tous les domaines de génie-civil, qu'il s'agit du bâtiment ou des ouvrages d'art comme les ponts, barrages ou encore dans les pistes d'atterrissage..etc. ; la demande en ce matériaux connaît une croissance considérable en rapport avec le développement du pays. Cette demande reste insatisfaite devant une offre insuffisante.

En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats alluvionnaires et/ou de carrière. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé, notamment dans les régions sud où l'approvisionnement en granulats devient très couteux vu l'éloignement des carrières, dans la majorité des cas.

Or, le sud Algérien dispose des réserves naturelles importantes renouvelables en sable de dune, caractérisé par une granulométrie fine mais de composition chimique et minéralogique riche en silicium. Ce paradoxe, a incité plusieurs chercheurs en matière de matériaux de construction à formuler un béton dépourvu du gros granulat et composé par conséquent essentiellement du ciment, du filler, du micro filler, du sable et de l'eau.

C'est donc dans un contexte de développement durable, la valorisation de sable de dune dans le génie civil permet de faire face au manque de gisements et à l'épuisement de granulats. Ce matériau va permettre de recentrer économiquement la consommation de granulats alluvionnaires en exploitant les stocks de sable de dune très abondants.

L'objectif voulu par cette étude purement expérimentale et qui vient suite à plusieurs recherches antérieures est la valorisation des matériaux locaux principalement le sable de dune très abondant (disponible dans près de 60% du territoire) ; ainsi la réutilisation des déchets industriels comme les fillers calcaires et les laitiers des hauts fourneaux, d'où un triple intérêt : technique, économique et écologique.

2. OBJECTIFS VISÉS

L'ENPA et le CNERIB ont lancé des projets de recherche sur le béton de sable dans les années 80. Au début, ces recherches avaient comme but la détermination d'une composition optimale, puis elles se sont intéressées à la recherche d'une amélioration de la résistance grâce à l'utilisation des fillers et des adjuvants. Par la suite des études de retrait, de fluage et d'adhérence aux armatures ont été effectuées. Plusieurs résultats ont été obtenus, mais ces derniers restent toujours insuffisants et non généralisés.

Le présent travail est une suite à ces travaux. Il s'inscrit donc dans un objectif général de valorisation des sables locaux qui sont disponibles en grandes quantités dans notre pays et de leur utilisation dans les constructions locales pour amortir la demande très élevée en gros granulats. Pour ceci, deux sables locaux, de provenances et de granulométries différentes, ont été envisagés : un sable de dune, un sable alluvionnaires et un mélange de ces deux sables. En ce qui concerne les fillers et le liant, des fines calcaires et laitiers des hauts fourneaux ont été utilisées comme filler et un ciment CPJ-CEM II /42.5B comme liant.

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante pour améliorer les propriétés du béton telle que la maniabilité, la résistance, la durabilité, etc. ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Le but de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'influence des ajouts minéraux (fines calcaires et laitiers des hauts fourneaux) sur les caractéristiques mécaniques des bétons de sables.

3. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

-  Le premier chapitre est consacré à la synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable (définitions, constituants, méthodes de formulations, caractéristiques, utilisations... etc.)
-  Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques des matériaux utilisés (ciment, sable de dune, sable d'Oued, eau, adjuvants & ajouts minéraux),

- ✚ Le troisième chapitre consiste à développer un plan factoriel pour l'optimisation du béton de sable de dune,
- ✚ Le quatrième chapitre concerne l'analyse et la discussion des résultats obtenus lors d'un programme expérimental issu de l'application d'un plan composite centré.
- ✚ En fin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

BETON DE SABLE

Introduction

L'utilisation des sables locaux comme matériaux de construction répond aux considérations économiques et écologiques. Les travaux menés dans le cadre du Projet National Sablocrete ont montré l'intérêt d'un tel matériau, aussi bien sur le plan technologique, que sur le plan environnemental [Chanvillart, 2000 ; Sablocrete, 1994]. Le béton de sable a fait également l'objet de quelques travaux et de nombreuses applications [Bederina et al., 2005 ; Hadjoudja, 2001 ; Breysse et al., 1997].

I-1 Historique du béton de sable

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19^{ème} siècle c'est à dire au début du développement du ciment armé.

En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré. Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité.

En 1869, le phare de Port-Saïd en Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France. Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleau à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleau et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m³ ; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers.

En 1918, une expérience très originale fut faite par Nicolas de Rochefort, à Saint Petersburg. Cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était ensuite mélangé avec trois parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable.

L'union soviétique, riche en sable, mais pauvre en gravillons et roches massives sur de vastes étendues, ne cessa, principalement depuis 1941, de faire du béton composé de sable et d'un ou deux liants (ciment et chaux), selon les opportunités. Les réalisations sont nombreuses. Citons parmi bien

d'autres :

- les pistes d'aérodromes militaires de Pevek et Arkhangelsk ;
- routes et autoroutes (Serpoukhov-Toula par exemple) ;
- bâtiments (toitures à plis, éléments divers préfabriqués dans la ville de Nadym, en Sibérie par exemple) ; -tunnels et métros (ombrelles d'étanchéité),
- mobilier urbain et éléments architecturaux ;
- travaux de rénovation d'ouvrages d'art (ponts, égouts, etc.). Notons ici l'importance Particulier et la technicité acquise du béton de sable mis en œuvre par projection ;
- voiles édifiés par coffrages glissants sur de grandes surfaces (Moscou, Voronej) ;
- tamponnage de puits de pétrole épuisés.

En France, en raison de l'abondance de granulats de gros calibre permettent d'obtenir plus facilement des résistances élevées, les bétons de sable ne connurent pas de réel développement jusqu'à la décennie 1970-1980.

Dans les années soixante-dix, notamment en France, on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

A partir des années quatre-vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé [SABLOCRETE,1994], pour la promotion et le développement de ce matériau.

Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre.

En Algérie malgré l'intérêt qui pourrait apporter ce matériau au pays aucun programme n'a été mis en place, à l'exception d'une initiative du CNERIB en 1988. Depuis ; même à petite cadence mais les recherches sur les bétons de sable contenues surtout sous forme des projets de fins d'étude, actuellement vu la rareté de granulats à béton surtout au sud algérien et où le sable de dune existe avec une grande abondance, la valorisation de ce matériau dans la squelette du béton a fait le thème

de quelques études et travaux de recherches universitaires et l'importance de ce sujet a pris beaucoup d'ampleur.

Nous citerons comme exemples :

L'étude menée par le CNERIB [Batata.A ; 1994] c'est l'étude qui a été présentée par A .BATATA. La présente étude consiste à formuler un béton de sable de dune pour l'obtention d'une compacité maximale. Les matériaux utilisés dans ce travail sont :

Un sable de dune d'El-Goléa qui a une granulométrie serrée au diamètre maximale de 0.5 mm et au module de finesse de 1,47.

Le ciment utilisé est le CPJ325 ;

Des fines calcaires obtenues par criblage du sable de concassage 0/3 à travers le tamis de 80 μ m.

L'amélioration de la compacité du béton peut varier en fonction du dosage en ciment (270 à 400 kg/m³). Ainsi qu'en teneurs en fines (0 à 10 %).

La composition optimale obtenue est comme suit :

Ciment = 330 kg/m³ ;

Sable = 1530 kg/m³ ;

Eau = 260 l/m³ ;

Fines = 6%.

Concernant le retrait est assez important (1,5 mm/m).

Un autre travail était mené dans ce sens par AZZOUZ .L et KENAI.S et BOUHICHA. M [B. Bouhnik, 2007].

Cette étude présente les propriétés du béton de sable de dune et l'influence des ajouts calcaires sur le béton de sable.

Les matériaux utilisés sont :

- Sable de dune de Laghouat au diamètre maximale qui n'excédait pas 0.63mm ;
- Ciment CPA 325 ;
- Des calcaires fins.

Après une série d'essais préliminaires en vue d'obtenir une composition optimale par la variation du rapport E/C de 0.6 jusqu'à 1.2.

Les compositions obtenues sont :

Tableau I.1 Compositions des bétons étudiés (à partir du sable de dune de Laghouat)

Béton	Sable (Kg/m³)	Ciment (Kg/m³)	Fines (Kg/m³)	Eau (l/ m³)	E/C
1	1486	330	-	264	0.8
2	1336	330	150	264	0.8
3	1286	330	200	264	0.8
4	1236	330	250	264	0.8

Ces compositions sont obtenues pour des consistances plastiques et des résistances à la compression de 13 à 18 MPa à 28 jours.

Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans les trois environnements suivants :

Environnements I : A l'air libre de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Environnements II : Dans l'eau potable à $15 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Environnements III : Dans l'étuve à $40 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Deux durées de cure sont proposées pour chaque environnement ; de 5 et 7 jours. Les meilleurs résultats de résistance sont obtenus avec le béton 3 dont les éprouvettes sont conservées dans l'eau (Environnements II).

Tableau I.2 Résultats de résistance du béton 3 (dans l'eau potable à $15^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$)

Durée de cure	Résistance à la compression $F_{C\ 28}$ (MPa)	Résistance à la flexion $F_{f\ 28}$ (MPa)
5 jours	17.73	7.90
7 jours	18.30	8.68

Cette étude est achevée par les conclusions suivantes :

- Quel que soit le mode de conservation et le dosage en fillers, l'âge du béton semble influencé positivement sur les résistances.
- La conservation dans l'eau est meilleure que celle à l'étuve et à l'air libre quel que soit le dosage et la nature des fillers.
- L'essai de retrait a montré que le béton de sable de dune présente de forts retraits hydrauliques. Ces retraits sont essentiellement dus à la finesse des fillers calcaires.

- L'ajout des fillers de brique a, légèrement, amélioré les résistances à la compression et à la flexion à tous les âges du béton par rapport au fillers calcaires.

Une autre étude menée dans ce sens ; elle consiste à améliorer les caractéristiques du béton de sable par différentes manières à savoir : l'addition de fillers, adjuvant et compactage pour le rendre plus résistant et plus compact. Cette étude a été élaborée par : GUETTELA .A., MEZGHICHE.B et CHEBILI.R [B.Bouhnik, 2007]

Les matériaux utilisés

- Le sable utilisé : est le sable de dune de la région de Biskra au module de finesse de 1.4 et un coefficient d'équivalent de sable de 87%.
- Ciment utilisé : est le CPJ45 de la cimenterie d'Ain-Touta.
- Les fillers : proviennent des déchets de polissage de carrelages à une porosité de 45% et une surface spécifique de 275 m²/kg.
- Les adjuvants : Deux types d'adjuvants sont utilisés ; un plastifiant (SFA) et un fluidifiant (SF). Le rôle d'adjuvant est de réduire la quantité d'eau et d'obtenir des bétons fluides en même temps. Les résultats expérimentaux sont :
- Le béton du sable témoin : sans addition ni de fillers, ni d'adjuvant donne une résistance à la compression de 12.5 MPa, la composition est comme suit :

Ciment : 350 kg/m³ ;

Sable : 1660 kg/m³ ;

E/C = 0.7.

Tableau I.3 Résultats de résistances (E/C=0.7, 2.5% d'adjuvant)

fillers (Kg/m ³)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	
	Fluidifiant (SF)	Plastifiant (SFA)
170	14.4	19.2
200	19	20.4
250	26.3	23.5
260	31	27.5
290	28	28.7
320	26	29
350	23.6	29.8

Tableau I.4 Influence d'énergie de compactage sur la résistance

Energie(KJ/dm ³)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	
	Sans fillers	Avec fillers
1.072	21.5	24
1.608	22	24.9
2.144	22.5	28.2
2.680	22.8	30.3

- La concentration des fillers assurant la meilleure résistance est de 260 Kg/m³ avec l'adjuvant (SF) (Tableau I.3). Par contre on remarque que la résistance augmente en parallèle avec l'augmentation du dosage en fillers avec l'adjuvant (SFA).
- L'énergie de compactage influe positivement sur la résistance sans ou avec fillers (Tableau I.4).

I.2 Caractéristiques générales des bétons de sable

I.2.1 Qu'est-ce que le béton de sable ?

Le béton de sable est un agglomérat artificiel fin composé principalement de sable (0/5mm), de ciment, de fines d'ajout et d'eau. D'autres ajouts spécifiques sont envisageables afin d'améliorer et de s'adapter aux besoins de certains usages. Le béton de sable chargé est obtenu suite à l'incorporation des gravillons tels que le rapport massique G/S soit inférieur à 0,7. Ce type d'ajout vise à augmenter la rigidité du squelette granulaire du béton de sable.

Le béton de sable se distingue des mortiers par sa composition (il comporte des additions), par son dosage en liant qualifié faible, par sa résistance plus élevée et par sa destination similaire aux usages traditionnels du béton. En termes de composition, il se distingue d'un béton ordinaire par un fort dosage en sable, l'absence ou le faible dosage en gravillons et l'incorporation d'addition(s). Mais, en termes de résistance et de dosage en ciment, ils sont presque similaires.

Dans la formulation d'un béton de sable il y a le sable et la pâte de ciment. Dans la composition suggérée, le sable de dune et le sable alluvionnaire (de correction) constituent le squelette. Le ciment et les autres ajouts forment la pâte de liant équivalent, autrement dit, le liant du béton. Cette pâte va remplir deux fonctions (physique et chimique). En premier lieu, elle confère au matériau à l'état frais des propriétés rhéologiques (cohésion, facilitant son écoulement et son moulage). Et en deuxième lieu, elle joue le rôle d'une colle qui conduit aux durcissements du mélange en développant des résistances mécaniques (naissance des liaisons chimiques suite aux réactions d'hydratation).

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 publiée en juin 1995 par AFNOR. Cette norme se réfère à la norme P18-305 révisée, relative aux Bétons Prêts à l'Emploi (BPE), qui introduit principalement la possibilité d'utiliser des additions et les modalités de leur prise en compte en substitution partielle du ciment, ainsi que la définition des caractéristiques de durabilité à respecter selon des critères d'environnement et de types d'ouvrage.

Il y a lieu cependant de souligner que les constituants entrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton, produit normalisé : il s'agit donc, à ce titre de produits eux-mêmes normalisés ou répondant à des avis techniques pour une utilisation comme composant du béton [SABLOCRETE, 1994].

I.2.2 Composants du béton de sable

I.2.2.1 Sables

On entend par le terme sable tout granulat alluvionnaire, de ballastière ou concassé conforme aux normes NFP18-541, NF P18-302 ou NF 18-309. Ce sont des matériaux inertes qui entrent dans la composition des bétons et mortiers. Les sables peuvent déroger à la norme NFP18-541 ou bien la compléter sur les points suivants :

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%.

La teneur maximale des éléments inférieurs à 0.08mm 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 ;

Propreté : La valeur de bleu au méthylène (VB) est inférieure ou égale à 1 (mesure à la tache norme P18-592). Le respect de cette spécification ne se substitue pas aux valeurs spécifiées pour les mesures d'équivalent de sable (ES). L'équivalent de sable d'un sable destiné au béton 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, le sable de dune pourrait être utilisé.

I.2.2.2 Ciments

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.

A l'instar des bétons classiques, le ciment adopté pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. 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 P98-170 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 [CIM Béton, 1995].

I.2.2 .3 Additions

Les fillers ou fines d'ajout sont utilisés pour répondre, d'un côté, à un besoin technique (amélioration de la compacité de l'empilement granulaire) et, d'un autre côté, à un besoin économique (en réduisant la quantité de ciment coûteux et causant des problèmes de retrait). Ils améliorent la cohésion du mélange qui dépend de leur nature minéralogique, de la finesse et de leur caractère actif ou inerte. La compacité dépend entre autres de la granulométrie du mélange, de sa teneur en eau et de l'énergie de mise en place.

La différence entre un béton de sable et un béton ordinaire réside principalement dans la différence de granulométrie. L'optimisation de la compacité, avec la granulométrie, obéit au principe des tables gigognes, c'est-à-dire que les éléments les plus fins vont loger dans les vides des éléments les plus grossiers [SABLOCRETE, 1994].

La formule inspirée de la théorie de la granulation optimale de Caquot en 1973, à savoir que le dosage optimal en ciment (ou en fines de même grosseur) dépend de la dimension D du plus gros granulat du béton, donne le dosage minimal suivant, selon la norme NF P18-305 :

$$C = (250 + 10f_{ck}) / (D)^{1/5} \text{ (en kg/m}^3\text{)[1]}$$

f_{ck} étant la résistance caractéristique spécifiée exprimée en MPa.

On voit manifestement que lorsque D diminue, comme c'est le cas des bétons de sables, le dosage devient très important. En effet, les vides d'un sable sont plus nombreux et globalement plus importants que ceux d'un gros granulat et cette règle risque de ne plus être techniquement et économiquement applicable si on considère, comme pour les bétons classiques, que la quantité de fines nécessaire pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut pour obtenir la bonne compacité ; autrement dit, il n'y a plus de concordance entre le dosage en ciment et en fines [Cissé, 1996].

En matière de béton de sable, l'addition comble une partie des vides du sable et participe à la rigidité du mélange (cas du filler non inerte) par un apport d'un complément d'hydraulicité. Dans ces conditions, on parle d'un liant équivalent (ciment + fines) au lieu d'un dosage en ciment seul. En cas de substitution d'une partie du ciment, la norme P18-500 remplacée par ENV 206-1 introduit cette notion de liant équivalent ($C+kA$) où C est le dosage en liant, A le dosage en fines d'ajout et k un coefficient de prise en compte de la nature de ces fines. A cet effet, le rapport E/C est remplacé par E/L où L est égal à $(C+kA)$.

L'apport complémentaire du pouvoir pouzzolanique des additions risque d'entraîner une chute de la résistance suite à une demande importante d'eau. Pour le cas des fillers actifs avides d'eau comme le Métakaolin, par exemple, il faudrait utiliser un réducteur d'eau pour améliorer davantage la résistance mécanique [Cissé, 1996].

En matière de maniabilité et de résistance, la morphologie et la texture des additions sont des paramètres très importants. En effet, les fines anguleuses se montrent plus avides en eau que celles sphériques. Aussi, le phénomène d'agglomération des éléments les plus fins sur les plus grossiers ou l'existence d'éléments alvéoles avides d'eau conduisent à une mauvaise correction granulométrique et à une surconsommation d'eau [SABLOCRETE, 1994]. Il faut savoir, par ailleurs, que la surface spécifique d'un filler n'augmente pas avec sa finesse puisqu'il a été trouvé qu'à diamètre moyen identique, la surface spécifique pouvait varier dans un rapport de 1 à 9 pour les cendres et le métakaolin ; il a été même constaté qu'un filler ayant une surface spécifique 1.4 fois plus importante pouvait exiger 25% moins d'eau (cas du carbosable et de métakaolin) et cela signifierait que la porosité accessible à l'eau a un rôle à jouer également [Ambroise et al. 1992].

De nombreux essais réalisés au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux [L.R.P.C, 1992] ont montré que la granulométrie des fillers ne jouait pas un rôle prépondérant et que ce sont plutôt la nature minéralogique, la composition chimique (activité pouzzolanique), la morphologie (forme, angularité ou état de surface) qui sont déterminantes. En effet, certains fillers dits « actifs »

contribuent au phénomène de prise hydraulique du ciment par association avec la chaux libérée par ce dernier et, de ce fait, améliorent la résistance. Cette amélioration peut également dépendre de la nature des cristaux formés et de leur qualité liante ; d'autres ont des besoins en eau différents les uns des autres et les excès d'eau contribuent à diminuer la résistance [SABLOCRETE, 1994].

En définitive, compte tenu de la complexité de la relation maniabilité-besoin en eau-nature du filler, des examens au microscope électronique à balayage peuvent s'avérer utiles. Dans tous les cas, il faudra systématiquement procéder à des essais et l'emploi d'adjuvants pourra résoudre souvent le problème avec bien sûr les incidences financières que cela peut défavorablement générer [Benaissa, 1992].

On distingue plusieurs types d'addition (active et inerte),

➤ **Laitier**

Ce sont des résidus minéraux résultant du refroidissement rapide des scories provenant de la fusion de minerais de fer en haut fourneau. Ce sont des combinaisons d'oxydes de calcium (CaO), de silicium (SiO₂) et de magnésium (MgO), les ciments au laitier offrent une meilleure résistance chimique aux environnements agressifs (eaux sulfatées, milieu marin) et permettent l'obtention d'une bonne durabilité du béton.

➤ **Cendres volantes**

Ce sont des produits pulvérulents provenant du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz brûlés des chaudières industrielles alimentées en charbon pulvérisé. Essentiellement siliceuses, parfois calcaires, elles ont des propriétés hydrauliques et / ou pouzzolaniques.

➤ **Fumée de silice**

Ce sont des sous-produits de la fabrication du silicium ou des ferro-silicium par réduction en four électrique du quartz par le charbon. Elles sont formées de particules sphériques très fines (de 0.01 à quelques microns) à très haute teneur en silice amorphe (>85% en masse). 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.

Eau de gâchage

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par la norme NF P18-303. La proportion élevée d'éléments fins dans le mélange nécessite un volume de mouillage plus important, ce qui engendre une augmentation du rapport E/C supérieur à celui des bétons ordinaires. Mais

l'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables.

Il existe une relation étroite entre la quantité d'eau et le pourcentage d'air occlus. Un bon béton n'admet pas un excès d'eau à la mise en place. Cela conduit à un pourcentage important des microbulles. Ces dernières, au-delà d'un certain dosage, sont nuisibles aux performances mécaniques. Les microbulles ont un diamètre supérieur à ceux des capillaires, ce qui leur permet d'interrompre le système capillaire et, à la fois, le pouvoir d'absorption à l'eau et aux substances nuisibles contenues dans l'eau, sulfates ou chlorures [Le Cointe, 1997].

L'eau de mer est déconseillée pour le gâchage du béton car cette eau contient une certaine quantité de chlorure de sodium qui est un accélérateur de durcissement dont les propriétés se rapprochent du chlorure de calcium.

Cependant, le gâchage en eau de mer ainsi que l'emploi de chlorure de calcium en tant qu'accélérateur est interdite dans la confection des bétons précontraints dont les aciers fortement tendus sont particulièrement sensibles à la corrosion (phénomène de corrosion sous tension).

Adjuvants

Les adjuvants sont les produits qui sont incorporés en très faible quantités aux bétons (dose inférieure à 5% du poids de ciment) avant ou pendant le malaxage, dans le but d'améliorer certaines propriétés, soit à l'état frais, ou pendant la prise et le durcissement, soit à l'état durci. On définit le superplastifiant d'après son action principale, même s'il a plusieurs actions secondaires. [Dreux, G.J Festa 1986]. On utilise les mêmes adjuvants que dans les bétons classiques avec la spécificité de privilégier les réducteurs d'eau qui améliorent la maniabilité et la résistance simultanément. Les adjuvants utilisés doivent être conformes à la norme NF P 18-103.

I.2.2 .4 Autres ajouts

Gravillons

L'incorporation des gravillons dans le béton de sable est tolérée tant qu'ils sont dispersés dans le mélange et ne constituent pas un squelette structuré. Ils permettent de raidir la structure du béton et d'augmenter la résistance aux déformations différées.

Le béton de sable chargé a le même comportement que le béton de sable pur tant que ces deux conditions sont respectées.

- ✓ Le rapport massique G/S (gravillons/sables) doit rester inférieur à 0.70 avec S représentant la fraction inférieure à 4mm ;

- ✓ Si on définit le sable et les gravillons respectivement par d_1/D_1 et d_2/D_2 la discontinuité entre le diamètre maximum du sable et le diamètre minimum du gravillon doit être telle $D_1 \leq d_2$ [Cissé, 1996].

Fibres

Les fibres ont comme objectif d'améliorer davantage la qualité du béton. Elles sont destinées à réduire les conséquences du retrait au premier âge et d'améliorer la résistance à la traction. 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.

Colorants

Ils sont utilisés pour les mêmes raisons que dans les classiques, mais ils nécessitent un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps [SABLOCRETE, 1994].

I.2.3 Propriétés générales des bétons de sable

I.2.3.1 Résistance et maniabilité

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

Les dosages en ciment de ces bétons sont de l'ordre de 250 à 450 Kg/m³, la compacité optimale est atteinte par adjonction des fines et de plastifiant. La résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60MPa selon la composition [Azzouz. H, 2009].

I.2.3.2 Granulométrie- Résistance

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

- ❖ **La finesse de l'addition** : plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc en gain de résistance ; ce résultat est valable quel que soit la granulométrie du sable (figure I.1).

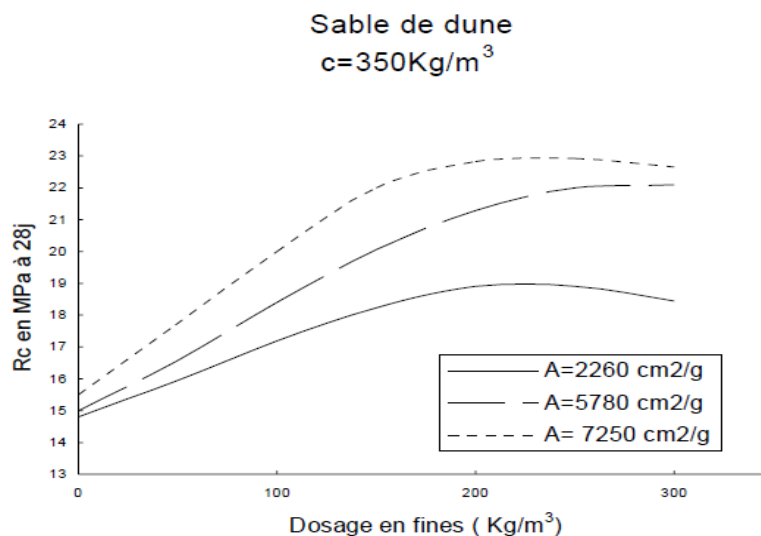


Fig. I.1 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [SABLOCRETE, 1994].

- ❖ **Nature de l'addition** : l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler : si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable (figure I.2).

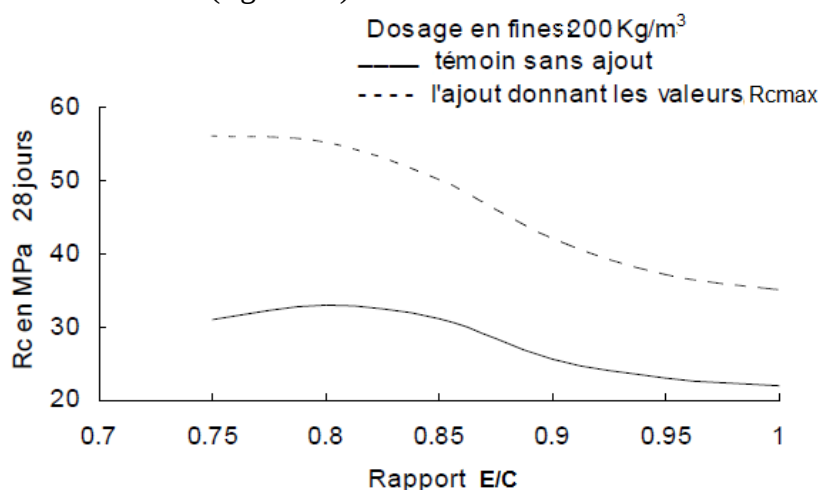


Fig. I.2 : Influence de la nature de l'addition sur la résistance [SABLOCRETE, 1994].

- ❖ **La dimension du D_{max} ($0/D$)** : Pour une même valeur du rapport E/C, on constate (figure I.3) que l'effet du diamètre D_{max} est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité ; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulu.

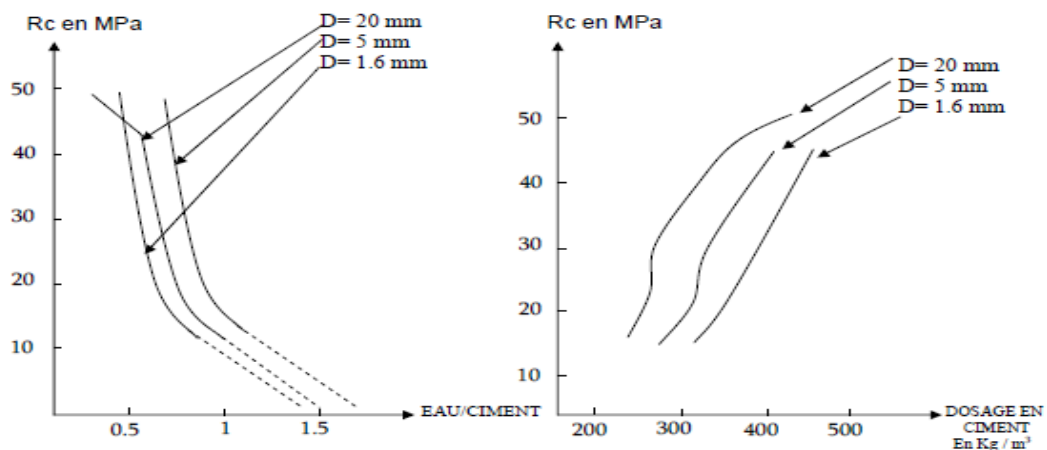


Fig. I.3 : Effet de la granularité sur la résistance des BS [SABLOCRETE, 1994]

I.2.3.3 Apparence

Le béton de sable permet des effets architectoniques très variés tels que surface très lisse, finement grenue et arêtes parfaitement définies.

A ces avantages, on pourrait ajouter les applications privilégiées dans les domaines des bétons non vibrés, de la projection (stabilisation de parois ou de talus), des travaux de reprise en sous-œuvre (fondations, cavités, etc.), de la préfabrication d'éléments destinés à rester apparents (parpaings, pavés, etc.). Les autres applications du béton (génie civil, bâtiment) sont également réalisables pour la plupart, le choix entre béton de sable et béton classiques résultant de la prise en compte globale des données technico-économiques locales [SABLOCRETE, 1994].

I.2.3.4 Durabilité

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques, etc., c'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité. Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables. Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico chimiques [SABLOCRETE, 1994].

- La perméabilité à l'eau est plus faible qu'un béton ordinaire ($2,5 \cdot 10^{-12}$ contre 10^{-10} m/s) ; 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'absorption initiale. Des résultats expérimentaux montrent un quasi proportionnalité entre profondeur carbonatée et absorption initiale [Balayssac, 1993].

- Le comportement à la pénétration des ions chlores est comparable à celui des bétons traditionnels. 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 –Saïd en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris, etc.

I.2.4 Caractéristiques spécifiques des bétons de sable

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances mécaniques des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montés en résistance est plus lente –ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrage mis en charge précocement – d'autre part, il est aisé d'obtenir des bétons de sables à hautes performances mécaniques, même à court terme. Toutefois, la vocation de ces derniers n'est pas de se substituer mécaniquement aux bétons ordinaires, mais d'être une nouvelle source de béton de qualité, au sens large. C'est dans cet esprit que plusieurs comparaisons ont été faites avec le béton classique dans l'objectif de voir dans quelles mesures les bétons de sable pourraient les remplacer. Plusieurs propriétés ont été étudiées.

A/ Adhérence aux armatures

L'essai d'arrachement, qui consiste à mesurer le déplacement d'une armature dans le béton durci en fonction de l'effort de traction, a révélé que les bétons de sable ne se distinguaient pas particulièrement des bétons classiques du point de vue de l'adhérence des armatures, [SABLOCRETE, 1994].

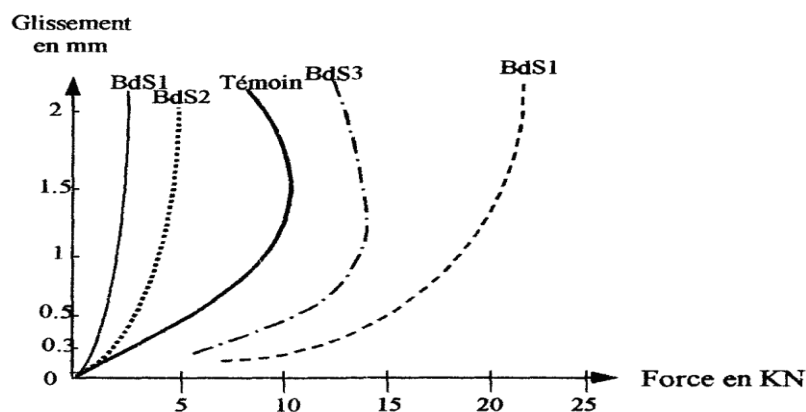


Fig. I.4 : Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation [SABLOCRETE, 1994].

En effet, selon la formulation du béton et la nature des armatures, on obtenait des résultats meilleurs ou moins bons qu'un béton ordinaire de référence. Il a été noté [SABLOCRETE, 1994] que la granularité du béton de sable n'est pas un élément déterminant puisque, à même niveau de résistance, l'adhérence avec un sable dunaire fin a été supérieure à celle obtenue avec un sable plus grossier.

B/ Retrait et fluage

Pour ce qui est de retrait, on en distingue deux : l'un dit d'auto-dessiccation se fait sans contact avec le milieu extérieur, alors que le second, appelé retrait de séchage, a lieu en milieu ambiant. Le premier est voisin de celui des bétons classiques, du moins pendant les deux premiers mois ; ensuite il y a tendance à la stabilisation [Benaissa, 1992]. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons.

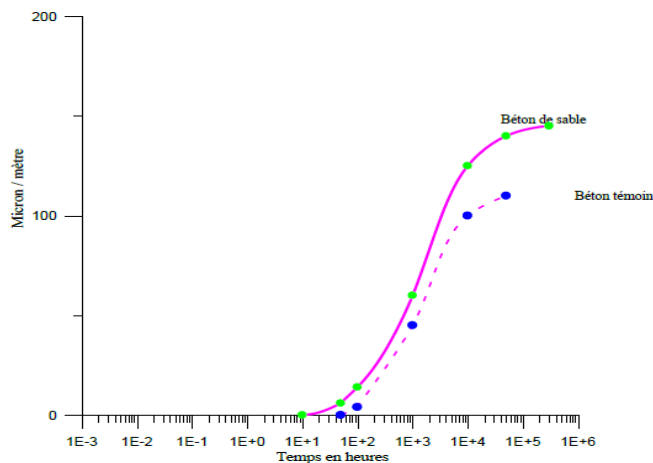


Fig. I.5.a Retrait d'auto-dessiccation.

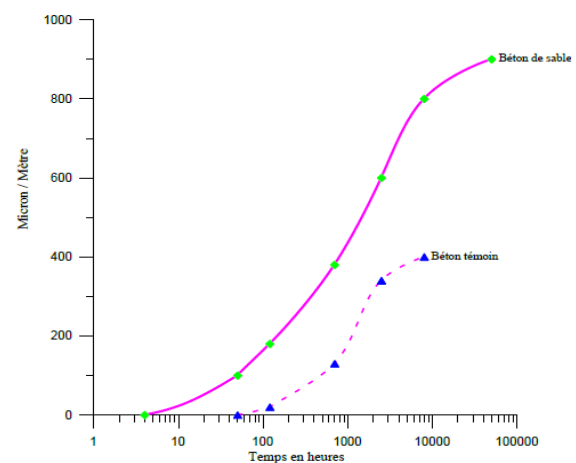


Fig. I.5.b Retrait total [SABLOCRETE, 1994].

Le fluage est une déformation qui résulte de l'effet d'une contrainte constante appliquée au béton. En matière de fluage, un phénomène analogue, lié à la structure du béton de sable et confirmé par des valeurs des modules d'élasticité très différentes entre les bétons de sable et les bétons ordinaires, a été observé. Mais, dans ce dernier cas, le niveau de résistance en compression (inférieure à 25 MPa) y est pour beaucoup. C'est ainsi qu'à un niveau de contrainte en compression de 25 MPa, on note à peu près la même chose, à savoir que la cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable, alors que le fluage de dessiccation du béton de sable a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importante.

Des essais ont montré que, en passant de 25 à 50 MPa, le fluage du béton de sable était divisé par 5 et n'était supérieur à celui du béton ordinaire que de 20% [SABLOCRETE, 1994]. De même, sous contrainte élevée, les déformations de fluage ne présentent plus de caractère linéaire et la limite de fluage linéaire pour les bétons de sable semble être en moyenne égale à 0.4σ , (σ , étant la limite de rupture), limite au-delà de laquelle il faut tenir compte du caractère non linéaire du fluage [Lvoviche, 1991].

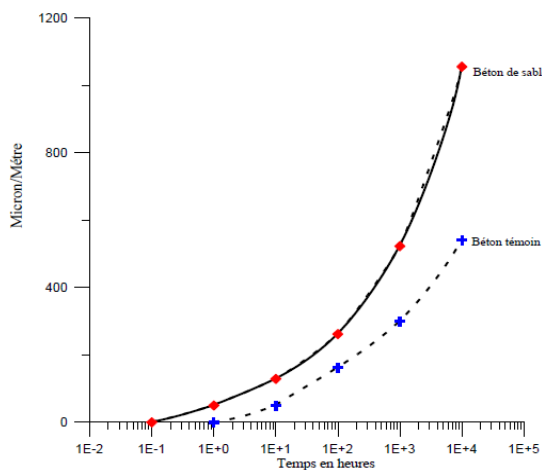


Fig. I.6.a Fluage d'auto-dessiccation.

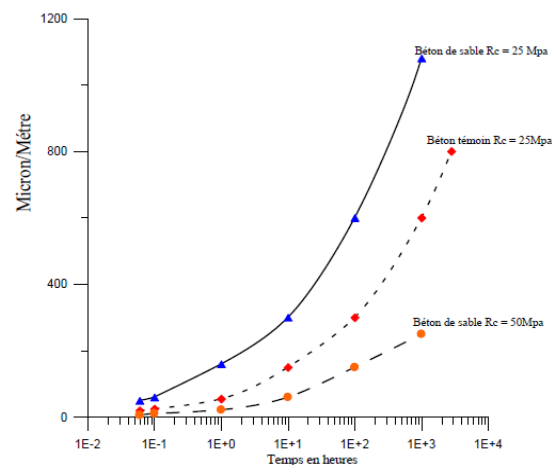


Fig. I.6.b Fluage total [SABLOCRETE, 1994].

I.3 Méthodes de formulation d'un béton de sable

La formulation d'un béton de sable consiste à trouver les proportions des différents constituants, afin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent en tant que critères techniques et économiques. Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème. Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique. A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre est expérimentale, en se basant sur les deux critères principaux des bétons structuraux :

- La résistance mécanique.
- La maniabilité (facilité de mise en œuvre).

I.3 1 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, et joue aussi le rôle d'une colle liant les granulats en donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange ; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{max}).

Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V = V_0 (d / D_{max})^{1/5} \dots \dots \dots [2]$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

D_{max} : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence telles que la méthode de Faury, Bolomey, Dreux, etc.

I.3.1.1 Dosage en fines d'un béton de sable

Pour le but d'optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable, il faut que ces constituants soient séparés en deux fractions :

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 μm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à 80 μm .
2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable D_{max} , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 μm , provenant des fines d'ajout. En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 μm et l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D)^{1/5} \dots \dots \dots [3]$$

$P_s (v)$: Porosité du sable d'étendue granulaire comprise entre 80 μm et D_{max} .

D_{max} : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V_0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8). Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80 μm , et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) et le volume de vide associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

$$[\text{Fines}] = [\text{Vides}]$$

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38(0.08/D_{\text{max}})^{1/5} \dots \dots \dots [4]$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.

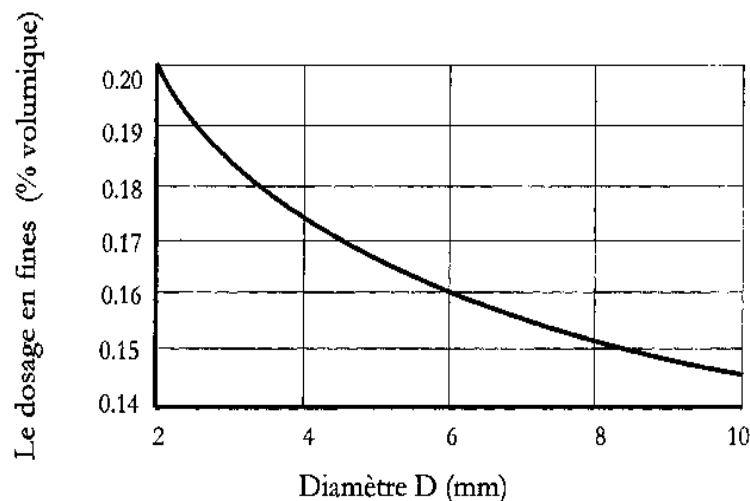


Fig. I.7 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [SABLOCRETE, 1994].

I.3.1.2 Dosage en eau d'un béton de sable

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 .

$$(e+v)_{\min.} = 0.8 (d/D_{\max})^{1/5} \dots\dots\dots [5]$$

Le calcul de la porosité minimale exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (60 / (f.r)) \text{ mm} \dots\dots\dots [6]$$

Avec

:

f : surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant ;

r : densité du constituant exprimée en g/cm^3 .

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères.

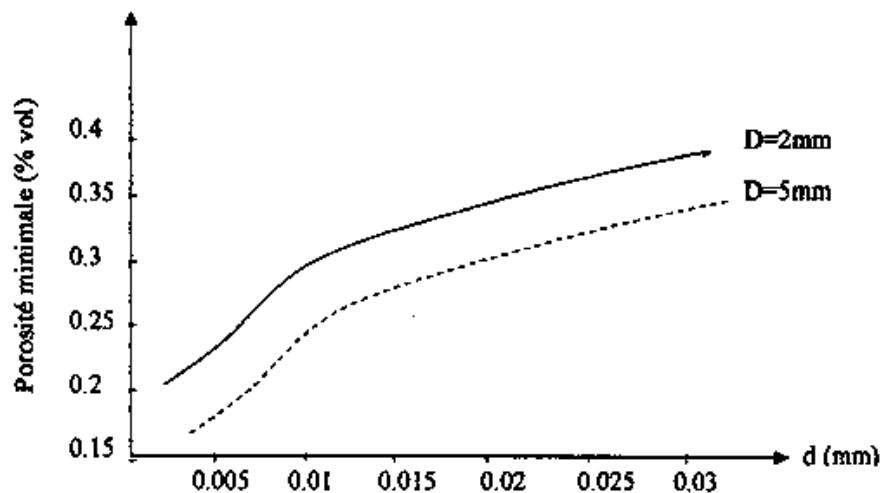


Fig. I.8 Influence de la dimension D sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable [SABLOCRETE, 1994].

Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés : la dimension des floccs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale (Fig. I.8).

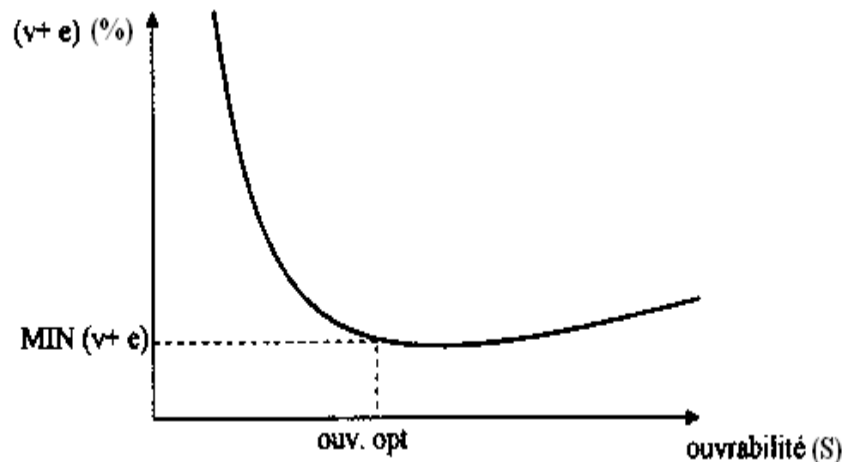


Fig.

I.9 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage $(e + v)$ d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [SABLOCRETE, 1994].

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité $(e + v)$ supérieure à $(e + v)_{\min}$, alors pour des quantités d'eau supérieures à celles qui donnent l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire (Fig. I.9).

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vide}] = K [\text{eau}] \dots\dots\dots(5)$$

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

I.3.1.3 Dosage en sable

Pour estimer le dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des constituants fines, eau et vides, comme ci-dessous :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fine}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] (\text{l/m}^3) \dots\dots\dots(6)$$

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à $80 \mu\text{m}$, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

I.3.1.4 Estimation de la résistance en compression

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de Feret [R.Feret, 1982] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{K_f R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{C(1+k_1+k_2)}\right)^2} \dots\dots\dots [7]$$

K_f : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

R_c : classe vraie du ciment (MPa) ;

e : dosage en eau totale (l/m³) ;

V : air piégée (l/m³) ;

C : dosage en ciment (kg/m³) ;

R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$$K_1 = K_{cv} (CV/C) + K_{fs} (FS/C);$$

$$0.2 < K_{cv} < 0.4 \quad 2 < K_{fs} < 3.3 \quad K_1 \leq 0.5$$

$$K_2 = K_{fi1} (Fil/C);$$

$$0 < K_{fi1} \leq 0.4$$

$$K_1 < 0.2$$

K₁ : coefficient pouzzolanique ;

K₂: coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv}., K_{fs}, K_{fil} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines ;

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m³).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés (K_{cv}, K_{fs} et K_{fil}). Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente.

Ainsi d'autres paramètres pourraient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. L'activité de filler calcaire présente un optimum au-delà duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques (Fig. I.10).

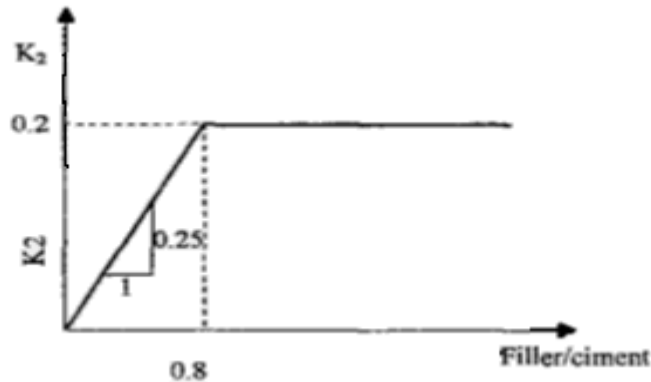


Fig. I.10 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [SABLOCRETE, 1994].

Ainsi il y a d'autre paramètre qui s'ajoutant pour le dosage en fines, toute fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité, ces fines regroupant le ciment, l'addition (filler calcaire, cendres volantes ...) et la fraction du sable inférieur à 80 μm , ainsi que l'optimum de la résistance serait atteint pour les dosages en ciment et en addition, solution du système suivant :

- Dosage en ciment + dosage en fines d'addition = dosage en fines.
- Dosage en fines d'addition / dosage en ciment = optimum d'activité.

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme. On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme.

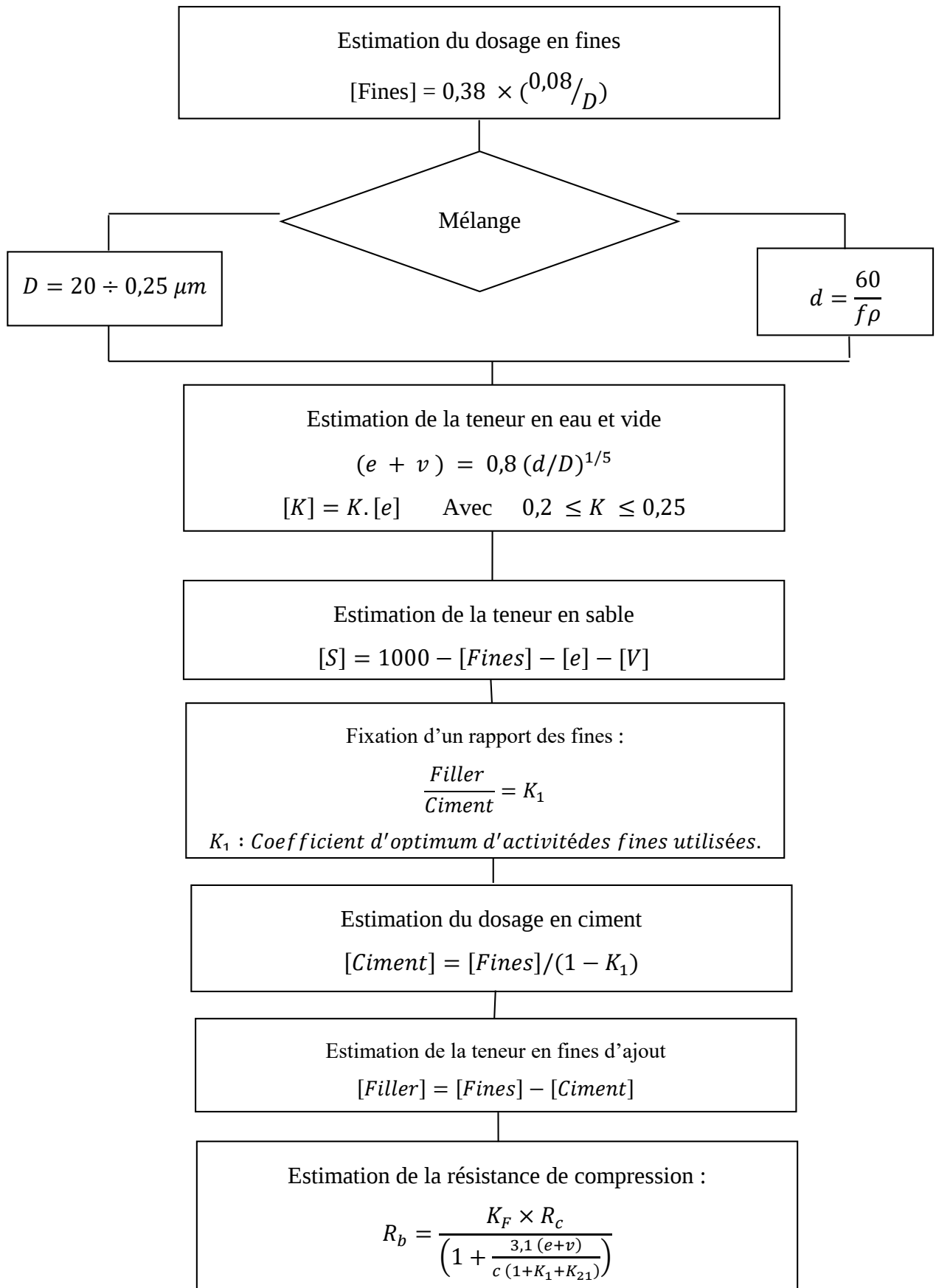


Fig. I.11 Organigramme de la méthode théorique [GUENOUN R., 2003]

I.3.2 Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable

I.3.2.1 Présentation générale de la méthode expérimentale

Dans le même but recherché par l'approche théorique, diverses méthodes expérimentales ont été mises au point ; ceci est dû aux nombreux facteurs qui sont à prendre en compte lors d'une étude de composition d'un béton. Chacune de ces formules conférerait au béton certaines qualités et en même temps certains défauts. La base de toutes ces méthodes est la réalisation de légères gâchées de béton à fin d'effectuer quelques mesures susceptibles de donner une appréciation à l'aptitude du béton dans sa destination.

La méthode présentée ici est une adaptation de la méthode de Baron-Lesage : elle est itérative et basée sur la réalisation des gâchées légères, qui sont caractérisées par des mesures de la maniabilité et de la masse volumique apparente. A noter que plusieurs formulations de béton de sable ont déjà été réalisées par cette méthode : bétons de pieux, bétons routiers, bétons de projection, etc.

I.3.2.2 Différentes étapes de la formulation

Après avoir rendu compte des matériaux entrant dans la composition du béton par une identification précise, l'obtention du mélange doit satisfaire à l'ordonnancement suivant :

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

Pour cela on cherche à réaliser un béton de sable dont la maniabilité est comprise entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre LCPL ; ce béton est composé seulement de ciment, d'eau et de sable.

Dosage en ciment :

Les dosages en ciment sont souvent influencés par la destination du béton (bâtiment, barrage, milieu agressif...etc.), mais on opte toujours à des minimums selon les prescriptions et les normes en vigueur. Ces dosages sont fixés lors de l'étude et sont notés par C (kg/m³).

Dosage en eau :

L'estimation du dosage en eau est approximative. A ce stade de la formulation et sur la base de l'expérience, les praticiens donnent à titre indicatif un dosage en eau de 220 l/m³ pour un dosage en ciment de 350kg/m³, 250l/m³ d'eau pour un dosage en ciment de 400Kg/m³, mais on peut toujours utiliser la formule exposée dans la méthode théorique permettant d'estimer le dosage en eau en fonction de la porosité du squelette granulaire.

$$E = \frac{800}{1 + \alpha} * \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \dots\dots\dots[8]$$

α Compris entre 0.1 et 0.15 ;

d est la borne inférieure de la phase solide du béton (mm) ;

D est la borne supérieure de l'étendue granulaire du sable (mm) ;

Dosage en sable :

Dans un premier temps et pour permettre la défloculation des fines, on utilise un fluidifiant réducteur d'eau au dosage normal préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm). Le béton contient toujours un volume d'air V_{air} , la teneur en air des bétons est de l'ordre de 3% en volume. Cette valeur est supérieure pour le béton de sable et se situe entre 5 % et 7 % du volume. Le dosage en sable peut être calculé par soustraction des différents volumes des constituants précédents

$$V_{\text{sable}} = 1000 - V_c - V_{\text{adj}} - V_{\text{air}} - V_{\text{eau}} \dots \dots \dots [9]$$

(Les volumes sont exprimés en litre).

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton de sable.

$$M_{\text{sable}} = MVA \times V_{\text{sable}} ;$$

M_{sable} : masse nécessaire pour 1 m³ du béton de sable ;

MVA sable : masse volumique absolue du sable ;

V_{sable} : volume du sable.

Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m³).

$$MVAT = m_{\text{ciment}} + m_{\text{eau}} + m_{\text{adj}} + m_{\text{sable}} \dots \dots \dots [10]$$

Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule :

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux critères essentiels :

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (10)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC. L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique

apparente théorique (MVAT) vers la masse volumique apparente réelle (MVAR)) et le temps d'écoulement de 7 à 10 S.

La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V \cdot XMVA_{\text{sable}} \dots [11]$$

Où

S_i : dosage en sable après correction ;

S_{i-1} : dosage en sable avant correction ;

MVAT, MVAR : masses volumiques du béton théorique et réel ;

MV sable : masse volumique absolue du sable ;

V : volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si l'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 11).

Il sera retranché si l'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 11)

Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle.

En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable

I.3.2.3. 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 ($MVAR = MVAT$).

Ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle.

Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés et fixés précédemment afin de les comparer aux critères imposés. Si ces derniers ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \dots [12]$$

Connaissant la maniabilité et la masse volumique pour chaque dosage en fines d'addition, on trace les courbes correspondantes : la masse volumique en fonction du dosage en fines et l'évolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines. Ces deux courbes permettent de définir les dosages optimums en fines et en sable correspondant à la formule la plus compacte et la plus maniable.

I.3.2.4. Evaluation de la résistance

Dans le but de la détermination de la résistance caractéristique du béton de sable ainsi formulé, des essais mécaniques classiques sont effectués. Si les résistances obtenues ne correspondent pas à celles recherchées, elles peuvent être modifiées en jouant sur les paramètres de départ ; augmentation ou réduction du dosage en eau et ou en adjuvant, ou changement du ciment.

La méthode expérimentale permet de formuler des bétons de sable et conduit à réaliser un nombre important de gâchées en laboratoire ; le recours préalable à une approche théorique constitue un outil efficace et utile et permet de réduire considérablement le nombre de gâchées.

I.4 Avantages et limite d'emploi des bétons de sable

I.4.1 Avantages des bétons de sable

I.4.1.1 Ouvrabilité

Cette la capacité du béton de sable à remplir les moules avec une énergie de serrage moindre, sans préjudice pour les autres propriétés du matériau, constitue un atout significatif dans bien des domaines. C'est ainsi que :

- Le béton de sable se révèle apte à garnir les éléments les plus fins ou les plus inaccessibles des moules ;
- Le béton de sable conserve sa cohésion, son homogénéité et de bonnes résistances, sans apport d'énergie de serrage ;
- Le béton de sable garantit un bon enrobage des aciers, même si le ferrailage est très dense ou très compliqué, et même quand la vibration est impossible ou inopérante ;
- Les distances de pompage sont accrues.

I.4.1.2 Qualité d'aspect

C'est la conséquence de leur ouvrabilité et de leur faible granularité, on peut obtenir facilement avec les bétons de sable des effets architectoniques aussi variés qu'étonnants et séduisants :

- aspect très lisse, type marbre ;
- aspect finement grenu, type pierre ;

- arêtes parfaitement définies ;
- reproduction fidèle de moules extrêmement fins ;
- absence de défauts d'aspect, notamment dus à la ségrégation.

I.4.1.3 Homogénéité-Cohésion

La composition et granulométrie confèrent aux bétons de sable homogénéité et cohésion. L'intérêt essentiel en est une réduction significative de la ségrégation, et de tous les déboires qu'elle entraîne. Mais ils offrent aussi une bonne résistance au délavage et une meilleure tenue aux chocs.

I.4.1.4 Applications privilégiées

Bétons non vibrés : Les bétons non vibrés, soit parce que la vibration est impossible, soit parce qu'il est jugé avantageux de s'en abstenir, ces bétons sont souvent des bétons fluides, utilisés notamment pour :

- La fabrication des pieux forés ;
- La réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants ;

Projection : Les bétons de sable projetés se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement, pour :

- la réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- la stabilisation de parois ou talus ;

Travaux en immersion : Avec un délavage limité conjugué à l'absence de ségrégation et au maintien des propriétés rhéologiques le béton de sable est adapté à la mise en œuvre de béton coulé sous l'eau les techniques de reprises en sous-œuvre, par injection ou coulage gravitaire : le béton de sable se situe favorablement par rapport aux coulis et mortiers. Citons, par exemple :

- la réparation de fondations,
- le comblement de cavités,
- la construction ou le renforcement d'ouvrages portuaires ;

Préfabrication d'éléments destinés à rester apparents : Les qualités de fini des surfaces et arêtes qu'on peut obtenir avec des bétons de sable, alliées à de bonnes performances mécaniques, sont des critères déterminants pour de tels éléments, type blocs de construction pour bâtiments ou clôtures, et éléments de mobilier urbain ou de jardin. Ces domaines d'utilisation privilégiés des bétons de sable sont ceux où la technique s'est révélée particulièrement prometteuse. Toutefois, les autres

applications du béton, que ce soit en génie civil ou en bâtiment, sont également réalisables, presque toutes, en béton de sable : le choix entre les deux types de matériau résulte alors de la prise en compte globale des données technico-économiques locales.

I.4.2 Limites d'emploi des bétons de sable

I.4.2.1 Raisons économiques

L'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas —un plus— dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé. En ce qui concerne notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquels nous pouvons tirer des fillers. Il existe également des fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

I.4.2.2 Raisons techniques

Des "**zones d'ombre**" existent encore sur la connaissance des caractéristiques et du comportement des bétons de sable : s'ils ont le même niveau de retrait que les bétons classiques, leur module d'élasticité est, par contre, inférieur de 20 à 30 %;

- par ailleurs le peu d'éléments disponibles sur leur comportement au fluage les exclut dans l'immédiat des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints ;

- même s'il existe des réalisations plus que centenaires (aqueduc de la Vanne sur une section de 40 km à Paris, phare de Port-Said en Egypte, mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris...), les données sur la durabilité sont peu nombreuses ;

- il n'existe encore pas de normes universelles sur les bétons de sable [Khady, 1993].

En conclusion ; la technologie du béton de sable étant récente, savoir-faire et expérience sont nécessairement à acquérir, de manière progressive, par les utilisateurs habituels du béton. Tant que la technique ne s'est pas vulgarisée, les différents intervenants de l'acte de construire doivent faire preuve de motivation pour décider d'employer le béton de sable et pour l'utiliser de façon satisfaisante : c'est par le biais d'actions en partenariat que peut s'échafauder un savoir-faire commun. La banalisation de l'emploi du béton de sable pour divers usages ne pourra intervenir qu'avec un recul suffisant dans le temps. A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques.

CONCLUSIONS

La vulgarisation du béton de sable ne vise pas à substituer les bétons traditionnels performants mais plutôt à être une nouvelle source de béton de qualité. Les études menées montrent la faisabilité d'utilisation de sable de dune dans le béton. Autrement dit la substitution des gros granulats du béton classique par ce matériau est envisageable pour certaines applications dans le domaine du bâtiment.

Pour avoir un béton de sable avec de bonnes performances mécaniques, Il faut veiller à ce que le béton soit le plus compact possible en choisissant des sables de bonne granulométrie et ayant le plus gros diamètre possible et en comblant bien les vides intergranulaires avec la proportion qu'il faut avec des fillers de bonne nature et de finesse élevée. Notons qu'une bonne mise en œuvre a aussi son effet sur la compacité du béton.

Les essais de retrait, de fluage, d'adhérence aux armatures et de durabilité n'ont fait pratiquement l'objet que de peu d'études récentes. Les résultats obtenus ne concernent que des matériaux et des compositions bien déterminés.

La synthèse des études et des recherches qui ont été réalisées sur l'utilisation des bétons de sable ont fait apparaître que le béton de sable peut constituer une solution économique intéressante dans plusieurs domaines de la construction et dans diverses régions. Ce matériau permet d'obtenir des performances mécaniques acceptables.

CHAPITRE II

CARACTERISTION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

CARACTERISTION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction

Le comportement rhéologique et mécanique du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants.

Notons bien que c'est de la qualité des matériaux (ciment, granulats et eau de gâchage), que dépendra en bonne partie la qualité du béton qui sera fabriqué.

Dans ce chapitre nous exposerons l'identification des différents matériaux utilisés pour cette étude, leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques (pour certains) ainsi que les différents essais au laboratoire permettant cette identification (modes-opératoire et normes), et les différents essais expérimentaux pour caractériser les mélanges du béton à l'état frais et durci.

II.2. Caractérisation des matériaux

II.2. 1. Sable

Dans cette étude on a utilisé deux types de sable :

- Un sable de dune provenant de la région Igosten de la ville d'Insalah.
- Un sable alluvionnaire de provenance Oued M'zi de la ville de Laghouat.

Caractéristiques physiques

a) Analyses granulométriques

Pour les deux types de sable, les analyses granulométriques effectuées sont données dans le tableau II.1, et sont représentées dans les figures II.1, II.2.

b) Module de finesse

Coefficient caractérisant la finesse d'un sable, Il est égal au $1/100^{\circ}$ de la somme des refus sur les tamis de maille : 0.16 , 0.315 , 0.63 , 1.25 , 2.5 et 5 mm.

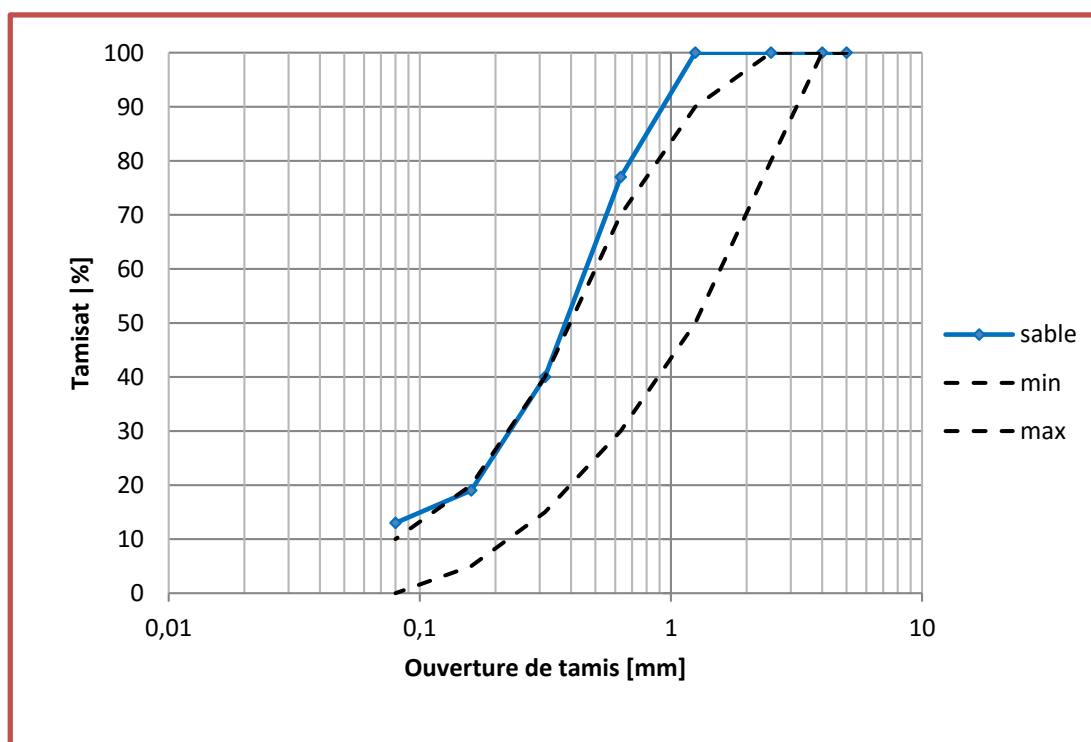
Ce coefficient peut conditionner le calcul du dosage en sable d'une composition de béton.

Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevé caractérise un sable grossier.

Le tableau et deux figures (II.1 et II.2) suivantes présentent les résultats d'analyses

Tableau II.1 : Résultats de l'analyse granulométrique des sables utilisés.

Norme d'essai : NFP 18-553 Température ambiante = 22 °C				
Diamètre des tamis (mm)	Sable de dune SD	Sable alluvionnaire SA	Fuseau de sable de référence selon le DTR B.E. 2.1	
	Tamisât en (%)	Tamisât en (%)		
5	100	100	100	100
4	100	100	100	80
2,5	100	98	90	80
1,25	100	95	90	50
0,63	77	65	70	30
0,315	40	14	40	15
0,16	19	3	20	5
0,08	13	2	10	0
Module de finesse	1,64	2,25	1,8 à 3,1	

**Fig.II. 1** : Analyse granulométrique du sable de dune SD.

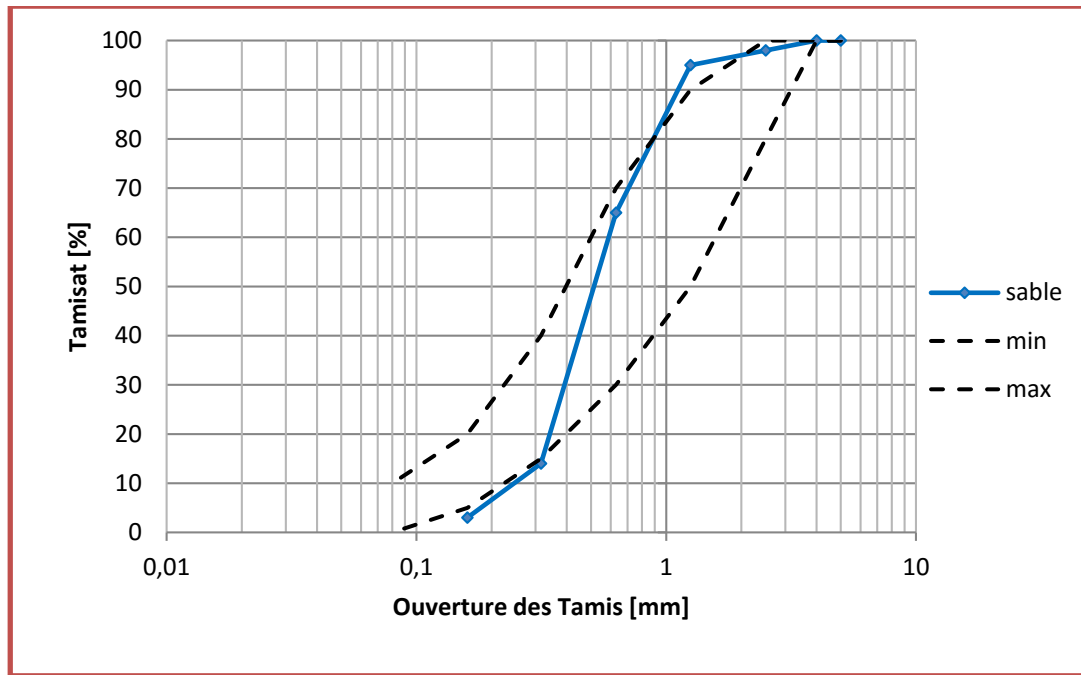


Fig.II. 2 : Analyse granulométrique du sable alluvionnaire SA

- Module de finesse du sable de dune (SD) est : $M_{f1} = 1,64$
- Module de finesse du sable alluvionnaire (SA) est : $M_{f2} = 2,25$.

c) Equivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme NF P18 598, est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 mn, on mesure les éléments suivants :

- Pour l'équivalent de sable visuel :
- Pour l'équivalent de sable à piston

$$E_{SV}(\%) = \frac{h_2'}{h_1} \times 100$$

$$E_{SP}(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

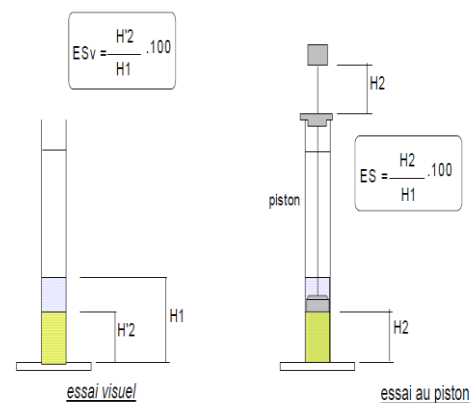


Fig.II. 3 : Essai d'équivalent de sable.

Tableau II. 2: Résultats de l'équivalent de sable

Type de sable	Sable alluvionnaire	Sable de dune
E_{sv} à vue (%)	72.3	86
E_{sp} à piston (%)	71.1	81.2

D'après ces valeurs on constate que les deux types de sables sont propres et peuvent être utilisés pour des bétons de qualité.

d) Masses volumiques

Masses volumiques absolues : est la masse de granulats secs rapportée au volume absolu (volume de solide), sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains. Ce paramètre intrinsèque a été mesuré à l'aide d'un pycnomètre à eau.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Masse volumique absolue de sable dunaire : 2.65 g/cm³

Masse volumique absolue de sable alluvionnaire : 2.54 g/cm³

Masses volumiques apparentes : est la masse de grains secs occupant un volume apparent, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Ce paramètre a été mesuré conformément à la norme P18-555.

$$\gamma = \frac{M}{V}$$

Masse volumique apparente de sable dunaire : 1.68 g/cm³

Masse volumique apparente de sable alluvionnaire : 1.53 g/cm³

La connaissance de ces deux grandeurs permet le calcul de la compacité.

La compacité des granulats dépend de plusieurs facteurs : de la distribution granulométrique des différents calibres constituant le matériau, la forme et l'angularité (roulé, concassé), la teneur en eau (rôle de lubrifiant) et le mode de mise en place (chute libre, compactage ou vibration). En général, plus le matériau est compact, plus il est performant en terme de résistance mécanique et aux agressions extérieures physico-chimiques.

La mesure de la compacité s'obtient par la mesure des masses volumiques absolues et apparentes du matériau (NF P18-554).

Elle est définie par :

$$C_p = \frac{V_s}{V} = 1 - P = \frac{\gamma}{\gamma_s}$$

Les valeurs obtenus pour la compacité de chaque sable utilisé ainsi que la porosité qui on est déduite, sont consignées sur le tableau suivant :

Tableau II. 3 : Résultats de la compacité et la porosité.

Type de sable	Compacité	Porosité
Sable alluvionnaire	60%	40%
Sable de dune	63%	37%

Compositions minéralogiques (DRX)

Afin d'identifier les phases cristallines contenues dans les sables utilisés (sable dunaire et sable alluvionnaire), nous avons eu recours à la caractérisation par diffraction aux rayons X.

Le spectre minéralogique obtenu révèle l'existence du quartz (Q), Calcite (C), Micas (M) et l'Anorthite (An). En outre les sables analysés sont constitués en majeure partie de Silice (SiO_2). (Voir figure II.4).

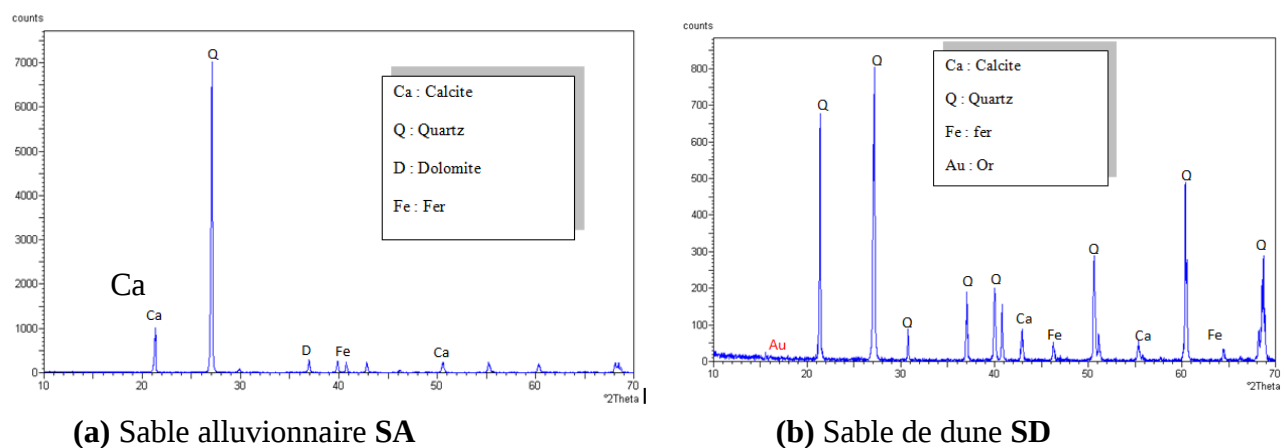


Fig. II. 4: Diagrammes DRX des deux sables alluvionnaire et dunaire

Analyses chimiques

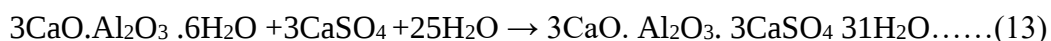
Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire LTP Sud de GHARDAIA.

Le tableau suivant résume les résultats des analyses chimiques des deux sables

Tableau II. 4 : Analyses chimiques des deux sables

Eléments chimiques	Sable dunaire (% massique)	Sable alluvionnaire (% massique)
SiO₂	80.99	74.08
CaO	9.24	15.76
Al₂O₃	0.06	0.14
Na₂O	0.01	0.05
MgO	0.65	0.44
K₂O	0.21	0.14
Fe₂O₃	1.44	1.05
SO₃²⁻	0.00	0.21
CL⁻	0.129	0.007

Les éléments chimiques dont on peut craindre la présence le plus sont les sulfates, rencontrés le plus fréquemment sous forme de CaSO₄. Ces sulfates peuvent attaquer le béton par l'intermédiaire de la réaction chimique avec les aluminates contenus dans le ciment :



Le produit obtenu (Hydro-sulfo-aluminate de calcium) en se cristallisant provoque des contraintes internes dans le béton d'où résulte une désintégration mécanique. D'un autre côté, ces sulfates en contact avec les armatures du béton de sable armé provoquent la corrosion de ces dernières et conduisent donc à une chute progressive de la résistance mécanique de l'ensemble béton-acier.

Le sable dunaire ne contient aucune trace de sulfates, le sable alluvionnaire étudié contient moins de 1% de SO₃ (0,21% exactement), taux qui correspond à un degré modéré d'agressivité selon la norme NFP 18-301.

Pour ce qui est des chlorures, les taux pour les deux types de sable restent tolérés.

(Taux < 0.65% : Pouvoir corrosif négligeable d'après DTU, Fascicule 65, Art 24-25)

II. 2.2 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment (CPJ-CEM II /B 42.5) provenant de la cimenterie de Msila, il s'agit d'un ciment composé destiné pour des ouvrages exposés à des conditions agressives.



Fig.II. 5 : CEM II/B 42,5 N (MATINE)

Caractéristiques physiques

D'après la fiche technique fournie par la cimenterie de Msila, les caractéristiques physiques sont résumées dans le tableau II.5.

Tableau II. 5 : Propriétés physiques du ciment

Propriété physique	
Surface spécifique méthode de Blaine en cm^2/g	3985
Temps de prise initial (min)	150 – 200
Temps de prise finale (min)	210 – 250

Compositions minéralogiques (DRX)

Les analyses minéralogiques ont été effectuées au niveau de l'université (Amar Telidji à Laghouat)

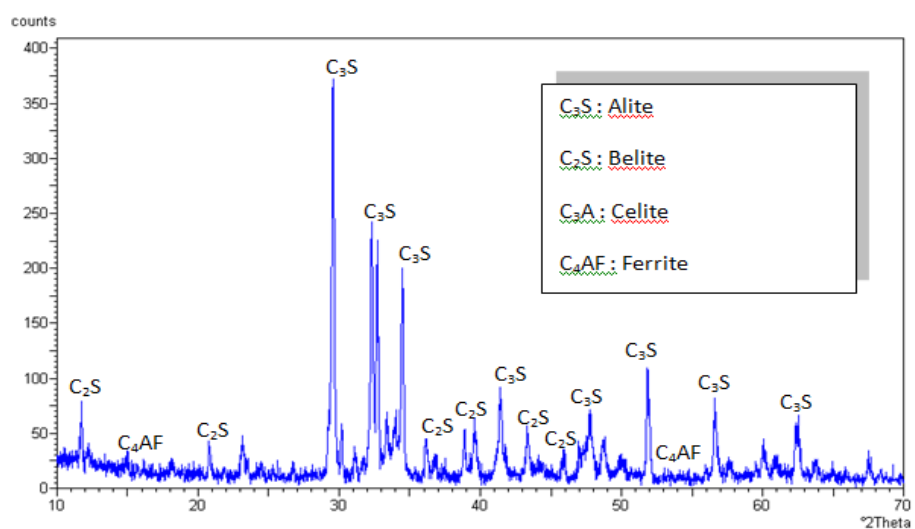


Fig. II. 6 : Diffractogramme aux rayons X de ciment

Analyses chimiques : résultats fournis par la cimenterie de Msila sont consignés sur le tableau II.6.

Tableau II. 6 : Analyses chimiques de ciment

Propriétés chimique	Matine (Résultats moyens)
SO ₃	2%
La perte au feu	9%
résidus insolubles	1.2%
MgO	1.4%
Cl ⁻	0.02%
Alcalis	0.3%
C ₃ S	64%
C ₂ S	15%
C ₃ A	7%
C ₄ AF	11%

Caractéristiques mécaniques

Le tableau II.7 résume les caractéristiques mécaniques.

Tableau II.7: Résistances mécaniques du ciment

Propriété mécanique	
Rc Après 2 jours (N / mm ²)	≥10 MPa
Rc Après 28 jours (N / mm ²)	≥42.5 MPa

II.2.3 Ajouts minéraux

Les additions minérales utilisées dans notre étude sont :

- 1- Un filler calcaire (calcaire finement divisé obtenu par broyage d'une roche calcaire) de provenance du laboratoire de génie civil de l'université Amar TELIDJI LAGHOUAT.
- 2- Un laitier granulé de haut fourneau de provenance de la cimenterie de M'SILA que nous avons broyé jusqu'à l'obtention d'une poudre fine à texture proche de celle du ciment.

II.2.3.1 Filler calcaire

Caractéristiques physiques

Analyse granulométrique

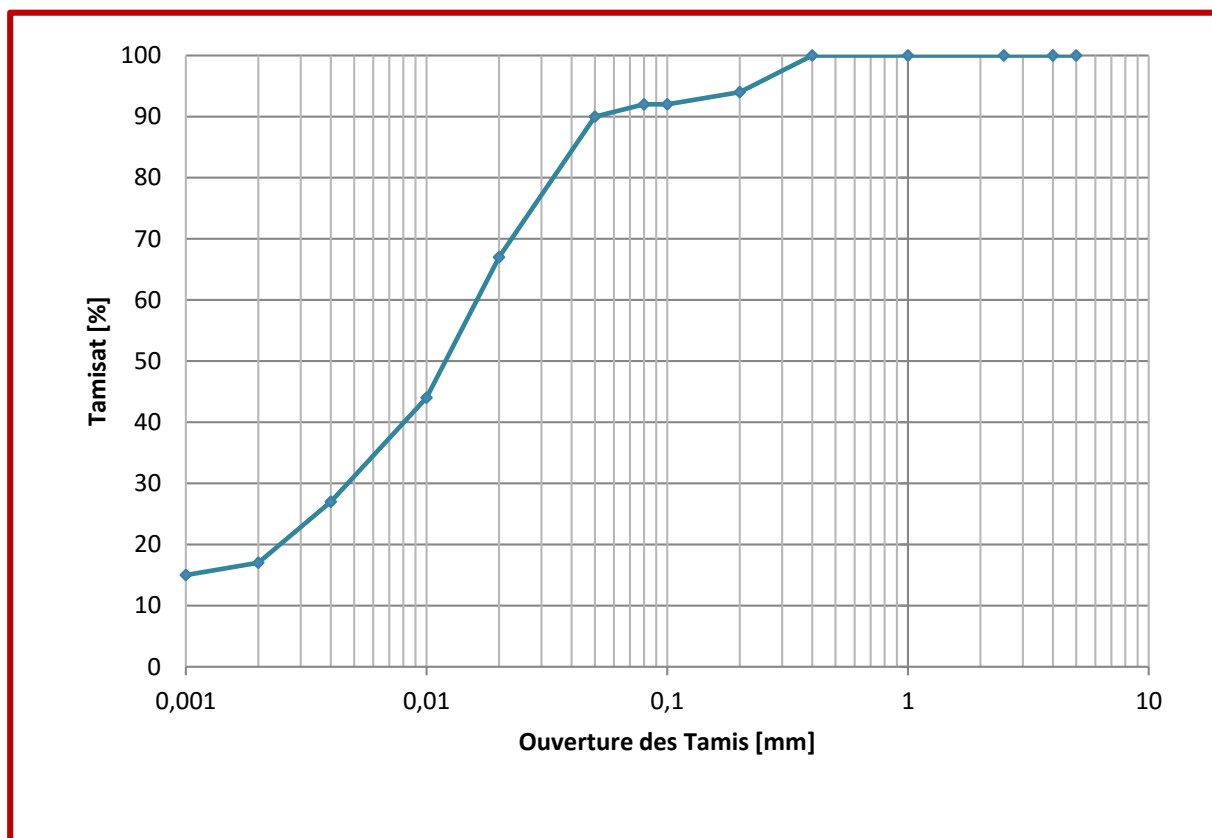


Fig II.7 : Analyse granulométrique du filler calcaire utilisé.

Tableau II. 1 : Caractéristiques physiques du filler calcaire utilisé.

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique Absolue (kg/m ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
1230	2700	3196

Compositions minéralogiques (DRX)

Nous tenons à mentionner que les essais minéralogiques ont été effectués au niveau de l'institut de physique de l'université AMAR TELIDJI.

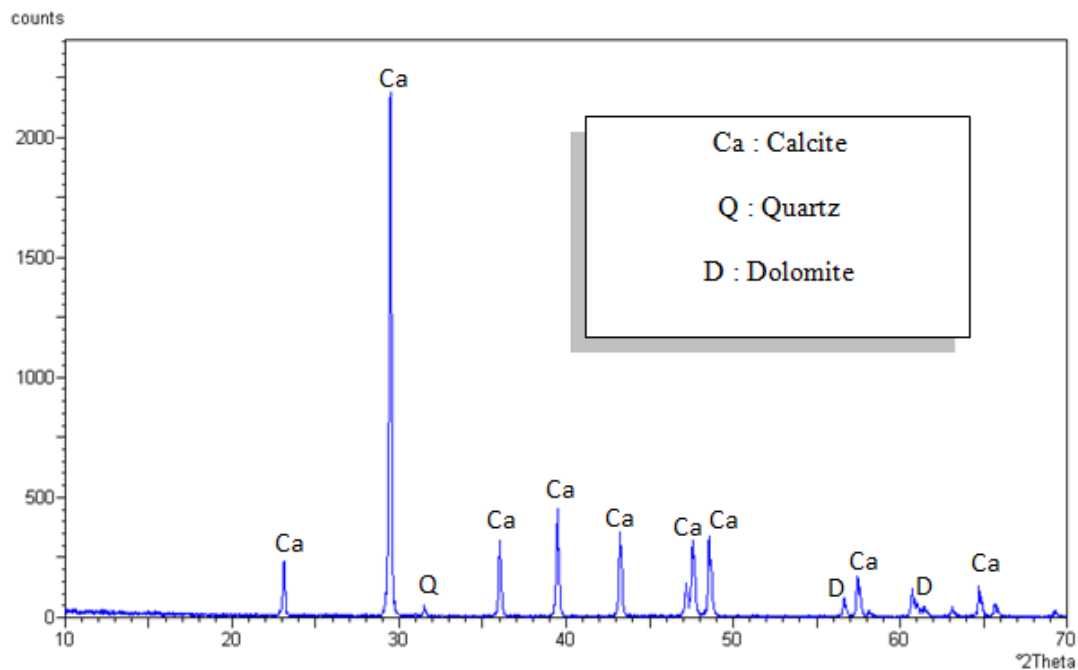


Fig.II.8 : Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires

Le diffractogramme du filler calcaire présente une dominance des pics de calcite. Les fillers utilisés dans ce travail sont de nature calcaire, constitués essentiellement de calcite (91% de CaCO_3). Ce choix est motivé par le fait que les fillers calcaires sont capables de créer des liaisons épitaxiales avec le ciment [Unikowski, 1981] ; ils sont susceptibles de s'intégrer dans la pâte de ciment, qui est constituée d'environ 80% de calcaire.

Analyses chimiques

Les analyses chimiques de cet échantillon ont été réalisées au laboratoire des travaux publics de sud (LTPS) à GHARDAIA.

Tableau II.9 : Caractéristiques chimiques du filler calcaire utilisé

Composant	carbonates	Insolubles	Sulfates
Contenu (%)	91	8.4	Nul

Nous avons complété cette analyse par l'essai au bleu de Méthylène, qui ne détecte aucune fraction argileuse active ($\text{VB}=0.25$).

II.2.3.2 Laitier de haut fourneau

Le laitier sujet de notre recherche provient de la cimenterie de MSILA, ainsi ils nous ont transmis ; sa composition chimique. Les essais complémentaires nous les avons réalisés après broyage du laitier.

Caractéristiques physiques

a) Analyse granulométrique :

La courbe granulométrique du laitier obtenue à partir de l'essai de sédimentométrie est présentée sur la figure II.10.

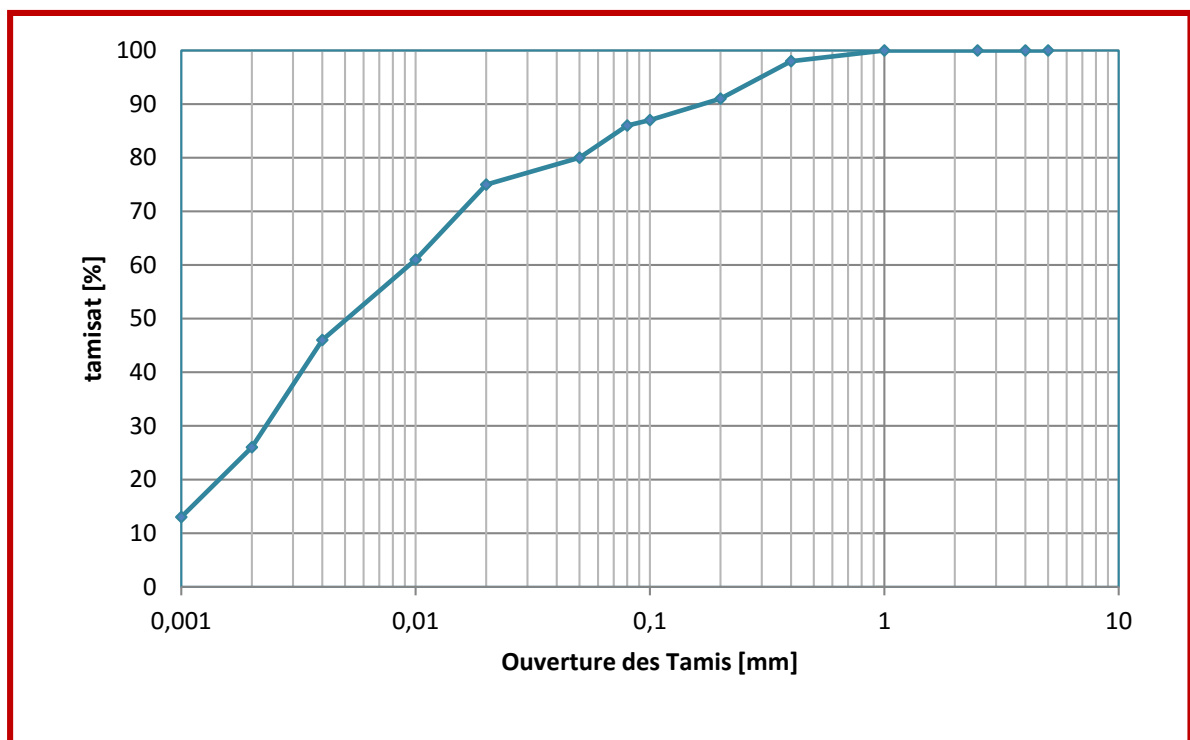


Fig.II.9 : Courbe granulométrique de laitier

b) Masses volumiques

Tableau II.10 : Caractéristiques physiques du laitier utilisé.

Masse volumique apparente (kg/m^3)	Masse volumique Absolue (kg/m^3)
1210	2860

Compositions minéralogiques (DRX).

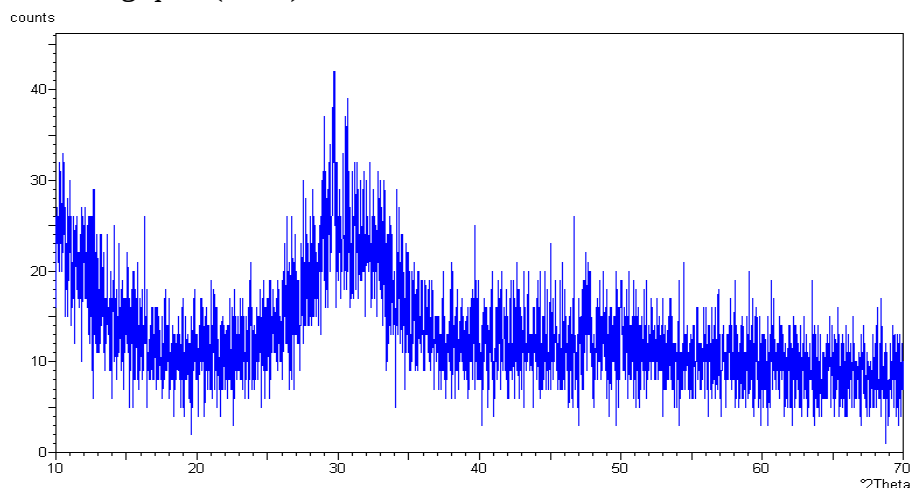


Fig.II.10: Diffractogramme aux rayons X de laitier

La composition minéralogique du laitier est déterminée par DRX. Le refroidissement brutal (trempe) du laitier sous un jet d'eau, permet l'obtention d'un état vitrifié (amorphe), ce qui explique l'absence de raie de diffraction dans le diffractogramme de rayons X [S.LEA, 2004].

Analyses chimiques

Tableau II.11: Caractéristiques chimiques du laitier utilisé

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Contenu (%)	35.59	12.92	0.77	40.2	9.14	0.38	0.23	0.25

La valeur au bleu de Mytilène est de 0.06

a) Module de basicité du laitier :

A partir de la composition chimique du laitier granulé, on peut calculer le module « M₀ » module de basicité, on appliquant les formules utilisées dans les références :

$$M_{01} = \%CaO/\%SiO_2 = 1.18 \quad M_{01} > 1 \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$M_{02} = \%CaO + MgO / \%SiO_2 = 1.43 \quad M_{02} < 1.5 \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$M_{03} = \%CaO + \%MgO / \%SiO_2 + \%Al_2O_3 \quad M_{03} > 1 \quad \dots\dots\dots(16)$$

D'après les résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique.

b) Indice d'hydraulicité du laitier :

En France, LANGAVANT a déterminé l'indice de qualité :

$$i = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0,5MgO - 2SiO_2. \quad \dots\dots\dots(17)$$

Cette formule est équivalente à celle de KEIL. Pour un indice : $i < 12$: on obtient un laitier présentant de faibles propriétés hydrauliques. Pour un indice : $i > 16$: on obtient un laitier représentant de meilleures propriétés hydrauliques.

Le laitier que nous avons utilisé présente un indice de qualité de : $i=8.21$ donc il s'agit d'un laitier à faibles propriétés hydrauliques.

II.2.4 Super plastifiant

Le super plastifiant (SP) utilisé dans notre étude est Sikaplast BV 40⁺. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération fabriqué par la société SIKALDJAIR. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés des bétons.

Tableau .II 12 : Propriétés du superplastifiant

Adjuvant	Nom commercial	Forme Couleur	Densité t/m ³	Plage d'utilisation
Superplastifiant	SIKAPLAST BV40	Liquide Maron	1,04±0,015	0,5 à 1,5 %

II.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 5 g/l pour les bétons à faible résistance.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

Tableau .II 13 : Analyse chimique d'eau de gâchage

Phi	PHt	SO ₄ ²⁻	Cl ²⁻	R.D.S
8.11	6.80	419.781mg/l	118.757mg/l	985mg/l

II.3 METHODES D'ESSAIS

II.3.1 Essais effectués sur béton frais

II.3.1.1 Affaissement au cône d'ABRAMS – (NF P18-451)

Le but de cet essai est de déterminer la consistance du béton

Equipement d'essai :

- Moule stable en forme de tronc de cône de 300 mm de haut, avec un diamètre inférieur égale à 200 mm et un diamètre supérieur de 100 mm.
- Main écope carrée ou ronde.
- Tige de piquage métallique de 600 mm de long et 16 mm de diamètre, arrondie aux extrémités.
- Surface de base rigide, plate et non absorbante (par ex. une tôle).

Exécution :

- L'essai doit être réalisé sur une surface horizontale ;
- L'essai complet doit être exécuté sans interruption en moins de deux minutes et demie ;
- Remplir le moule tronconique sur trois hauteur et piquer chaque couche de béton avec la tige 25 coups, surfer le bord ;
- Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes
- Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près.



Fig.II.11 : Affaissement au cône d'Abrams

II.3.1.2 Teneur en air occlus du béton (NF P18- 443)

Le but de cet essai est de mesurer la quantité des bulles d'air emprisonnées dans le béton testé.

Equipement d'essai :

- Aéromètre à colonne ou à manomètre ;
- Main écope carrée ou ronde ;
- Tige de piquage métallique de 600 mm de long et 16 mm de 2mm diamètre, arrondie aux extrémités.

Remplissage du récipient et serrage du béton :

À l'aide de la main écope, placer le béton dans le récipient de manière à éliminer autant d'air occlus que possible. Introduire le béton en trois couches d'épaisseurs approximativement égales. Serrer à refus le béton immédiatement après son introduction.

La quantité de matériau utilisée dans la couche finale doit être suffisante pour remplir le récipient sans avoir à retirer du matériau en excès. Une petite quantité de béton supplémentaire peut être ajoutée si besoin et serrée ensuite afin de remplir le récipient, mais il convient d'éviter de retirer du matériau en excès.

Deux méthodes alternatives sont possibles :

- La méthode de la colonne d'eau.
- La méthode du manomètre.

Pour les deux méthodes, il convient de nettoyer soigneusement les rebords du récipient et du couvercle et de s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient. L'essai sera ensuite réalisé conformément à la norme et le résultat exprimé en % arrondi à 0,1 % près. Ces essais ne sont pas significatifs pour des bétons d'affaissement nul et les bétons réalisés avec des granulats poreux ou légers.



Fig.II.12 :Aériomètre

II.3.1.3 Masse volumique du béton frais (NF P18- 440)

Le but de cet essai est de déterminer la densité du béton frais.

Appareillage :

Récipient étanche à l'eau, suffisamment rigide. Le bord supérieur et la base doivent être parallèles. La plus petite dimension du récipient doit être égale à au moins quatre fois la dimension du plus gros granulat du béton, mais doit être au moins égale à 150 mm. Le volume du récipient ne doit pas être inférieur à 5 litres.

Les récipients suivants peuvent être utilisés :

- Cylindre 16 x 32 métallique ou plastique.
- Pot spécifique.
- Cuve de l'aériomètre.

Balance permettant de déterminer la masse du béton après serrage avec une précision de 0,01 kg.

Réalisation de l'essai :

Remplir le moule et serrer le béton à refus par couches d'épaisseurs approximativement égales et de hauteur maximale d'environ 100 mm. La surface supérieure doit ensuite être talochée et soigneusement arasée avec la règle.

La masse volumique est calculée selon la formule :

d est la masse volumique du béton frais, en kilogramme par mètre cube (kg/m^3) ;

m₁ est la masse du récipient, en kilogramme (kg) ;

m₂ est la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en kilogramme (kg) ;

v est le volume du récipient, en mètre cube (m^3).

$$d = (m_2 - m_1) / v \dots \dots \dots (18)$$



Fig.II.13 : Mesure de la masse volumique du béton frais

II.4 Confection des éprouvettes (NF EN 12390-2) et conditions de conservation

Pour chaque formulation nous avons confectionné 12 (douze) éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ c.à.d. quatre séries ; trois séries pour les essais de traction par flexion , et trois éprouvettes comportant des plots à leurs extrémités destinées pour l'essai de retrait. Pour la détermination de la résistance à la compression nous avons opté pour des moules cylindriques de dimension $11/22 \text{ cm}$ dont nous avons fabriqué 09 (neuf) éprouvettes.

Les 03 (trois) séries des éprouvettes confectionnées pour chaque mélange, qu'elles s'agissent des éprouvettes prismatiques ou cylindriques sont désignées pour être écrasées à 07, 14 et 18 jours d'âge de béton testé.



Fig. II.14 : Confection de 09 éprouvettes cylindriques (pour écrasement) et 12 éprouvettes prismatiques dont 09 pour écrasement et 03 pour l'essai de retrait.



II.4.1 Malaxage

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut respecter :

- L'ordre d'introduction des composants ; nous avons mélangé à sec les constituants jusqu'à homogénéisation, puis on introduit l'eau avec l'adjuvant ;
- La vitesse de rotation de la cuve de la bétonnière employée ne dépasse pas 20 tours/mn ;

Le temps de malaxage d'un béton courant à gros granulats est de l'ordre de 45 secondes. En revanche, les bétons riches en éléments fins (tel est notre cas) peuvent nécessiter des durées de malaxage plus longues : 1 à 2 minutes.



Fig.II-15 : Malaxage du béton

II.4.2 Vibration

Une bonne vibration est la manière la plus adéquate pour obtenir un matériau homogène et le plus compact possible ; avec un minimum de vide d'air.

Lors de cette étude on a utilisé la table vibrante pour les moules prismatiques avec un temps de vibration fixé à une minute ; cependant pour les moules cylindriques il a été adopté un simple piquage pour les bétons dont l'affaissement au cône d'Abrams est de 9 cm et plus. L'aiguille vibrante a été utilisée pour les bétons moins plastiques.

Tableau .II 14 : Puissance de serrage de béton en fonction de la plasticité

PLASTICITE	SERRAGE	AFFAISSEMENT (en cm)
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9
Béton mou	Piquage	10 à 13
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14

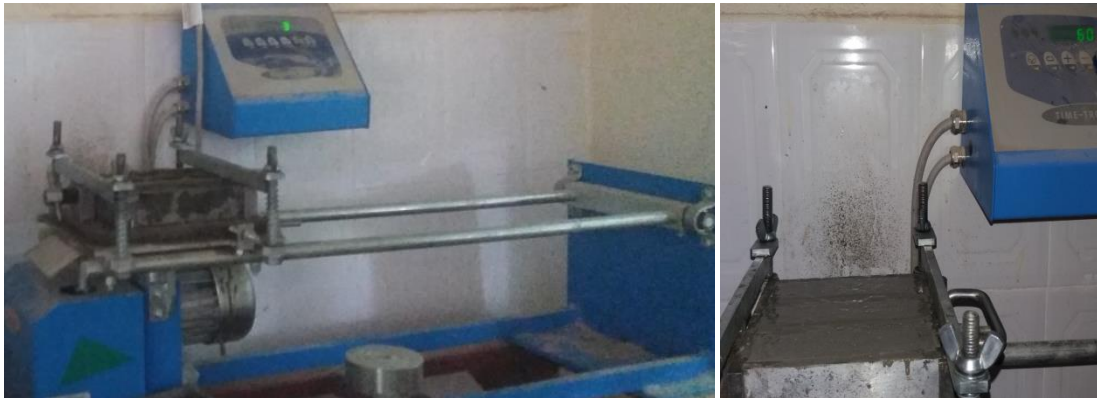


Fig.II.16 : Utilisation de la table vibrante pour les moules prismatiques

Serrage par la table vibrante :

La vibration doit être appliquée durant le temps nécessaire au serrage a refus du béton, il est préférable que le moule soit fixe ou maintenu fermement contre cette table, toute autre vibration excessive doit être évitée, afin de ne pas provoquer une diminution de l'air entrainé.



Fig.II.17 : Serrage par piquage
(Affaissement > 9cm)

Serrage manuel avec la tige de piquage ou barre de piquage :

Les coups appliqués par cette tige ou cette barre doivent être uniformément repartis sur toute la section du récipient, il faut veiller à ce que la tige de piquage ou la barre de piquage ne vienne pas en contact brutal avec le fond du récipient lors du serrage de la première couche, et ne pénètre pas sensiblement dans une couche précédente. Le béton doit être soumis à au moins 25 coups par couche. Après serrage de chaque couche et afin d'éliminer les bulles d'air emprisonné par l'air entraîné, tapoté à la surface et ~~que~~ les traces laissées par la tige ou la barre de piquage doivent disparaître.



Fig.II.18 : Vibration par aiguille vibrante (affaissement <9cm)

Serrage par aiguille vibrante :

La vibration doit être appliquée durant le temps minimal nécessaire au serrage à refus du béton. Toute vibration excessive doit être évitée, afin de ne pas provoquer une diminution de l'air entraîne.

II.4.3 Arasement

L'arasement est une opération de finition des éprouvettes ; en cas d'utilisation d'une rehausse de remplissage, celle-ci doit être enlevée immédiatement après le serrage.

Le béton se trouvant au-dessus du bord supérieur du moule doit être enlevé au moyen de deux truelles ou taloches en acier, par un mouvement de sciage de l'extérieur vers l'intérieur, puis la surface doit être soigneusement arasée.



Fig.II.19 : Arasement des éprouvettes

II.4.4 Marquage

Les éprouvettes doivent être marquées sans endommagement de façon claire et durable. Les enregistrements doivent permettre de garantir l'identification de l'éprouvette depuis le prélèvement jusqu'à l'essai.



FigII.20 : Exemple de marquage la combinaison N°14.

II.4.5 Conservation

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs, les vibrations et la dessiccation pendant un minimum de 16h et un maximum de 3jours, à la température de 20 ± 5 °C. Après démoulage, les éprouvettes doivent être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai, à

une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, ou dans une chambre de conservation a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une hygrométrie relative $\geq 95\%$.



Fig. II.21 : Conservation des éprouvettes dans des bacs galvanisés à une température maintenue constante à $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

II.5 Essais effectués sur béton durcis

Dans cette partie, les propriétés physiques et mécaniques des bétons durcis ont été étudiées à savoir : la résistance à la compression, la résistance à la flexion par traction ainsi que la mesure de retrait. Pour tous ces essais nous avons confectionné respectivement des éprouvettes cylindriques ($\varnothing 10\text{ cm/h}20\text{ cm}$) ($10 \times 20\text{ cm}$) et des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$. La température des bacs de conservation a été maintenue constante à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, comme la stipule la norme NF EN 12390-2.

II.5.1 Essais de compression simple (NF-P 18-406)

L'essai de compression sur les éprouvettes en béton est le principal essai pour caractériser la résistance mécanique de celui-ci. Les éprouvettes devant être surfacées peuvent être extraites du milieu de conservation au plus 24 h avant l'essai.

Les essais seront effectués sur des éprouvettes cylindriques (diamètre 10cm /hauteur 20cm), pour des âges de béton de 7, 14 et 28 jours.



Fig.II.22 : Essai de la compression



La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale, donnée par la formule suivante :

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(19)$$

Avec :

Rcs: Contrainte à la compression (en MPa) ;

Ps: Charge de rupture (en KN) ;

Ss: Section de l'éprouvette (cm²).

II.5.2 Essais de traction par flexion (NF –P 18-407)

La résistance à la traction par flexion est mesurée selon la norme NF P 18-407. L'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion, sollicitant l'écrasement d'éprouvette prismatique 4x4x16 cm³ à une flexion directe.

La résistance à la traction par flexion se calcule par la formule qui suit :



Fig.II.23 : Essai de la traction par flexion

L'essai se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge devront être rectifiées ou apprêtées. La résistance à la traction par flexion se calcule comme suit :

$$f_{cbt} = \frac{3Pl}{2bh^2} \dots\dots\dots(20)$$

Avec P la charge maximale, l la portée libre, b la largeur et h la hauteur du prisme.

II.5.3 Essais de Retrait (NF P15-433)

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes à l'état durci, dues aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires. Cet essai est réalisé sur matériau durci grâce à un rétractomètre permettant de mesurer les variations de longueur d'échantillons placés dans une salle climatisée à 20 ± 2 °C et à $55 \pm 5\%$ d'humidité relative, selon la norme NF P18-433 [AFNOR, 1994], et selon deux conditions :

- En échange hydrique du matériau avec le milieu : on obtient le retrait total,

Après démoulage (après 24 heures), les mesures du retrait total et du retrait endogène sont effectuées sur trois éprouvettes prismatiques de dimension $4 \times 4 \times 16$ cm³. Elles sont exécutées à des échéances très courtes au début, la périodicité de mesure augmente ensuite avec le temps (les éprouvettes sont disposées de manière à ce que chacune d'elles soit distante des voisines d'au moins 1 cm, et qu'elle soit entourée d'air sur toutes ses faces). Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le béton au coulage (ou collés sur les faces rectifiées des éprouvettes). L'étalonnage du rétractomètre est effectué à l'aide d'une tige étalon en Invar qui sert de référence de mesure, parallèlement à ces mesures au rétractomètre, (fig.II.25).

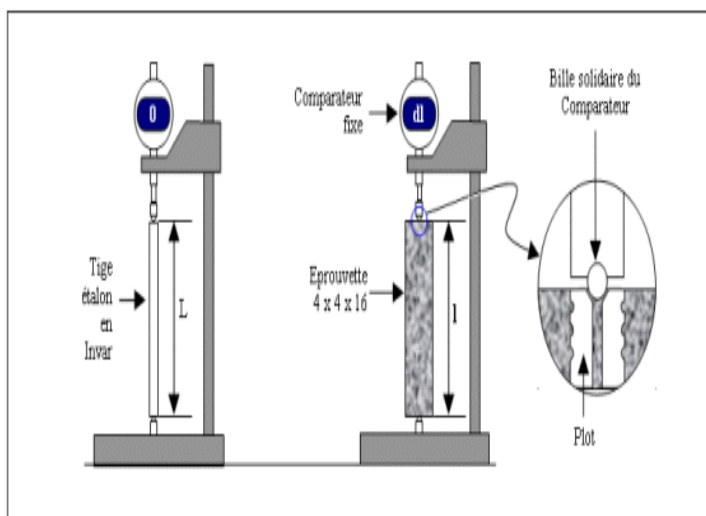


Fig. II.24 : Mesures de retrait

II.6 Méthode de plan d'expérience

La méthode des plans d'expérience utilisée dans cette recherche est une méthode statistique qui permet d'étudier un grand nombre de paramètres, avec un nombre réduit d'essais. Pour cela on a construit un plan factoriel fractionnaire à huit essais et six facteurs, trois facteurs principaux et trois facteurs d'interaction, chaque facteur varie à deux niveaux max et min.

II.6.1 Plans pour surfaces de réponse

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans inter-actions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés, car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. On fait alors appel aux plans pour surfaces de réponse. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert.

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

– pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \dots\dots\dots(21)$$

– pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \dots\dots\dots(22)$$

II.6.2 Présentation des plans composites

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle PDAI (termes du premier degré et termes d'interactions). Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les *points en étoile*. Les plans composites présentent donc trois parties.

Le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d'étude.

Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.

Les points au centre du domaine d'étude. On prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (n_f), des essais du plan en étoile (n_a) et des essais au centre (n_0). Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation :

$$n = n_f + n_a + n_0 \quad \dots\dots\dots(23)$$

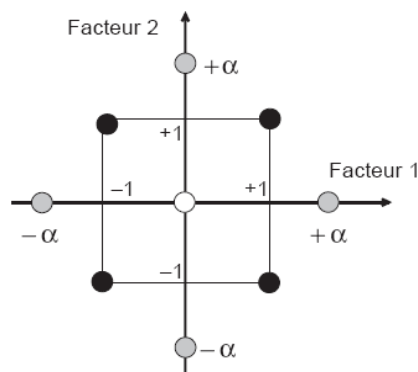


Fig. II.25 : Plan composite pour l'étude de deux facteurs

Les points factoriels sont en noirs, les points en étoile sont en gris clair, les points centraux sont en blanc. Le nombre de niveaux est 5 pour chacun des facteurs et seulement 3 lorsque l'on a un plan composite à faces centrées.

Position des points en étoile

C'est un sujet qui a passionné de nombreux statisticiens et il existe des livres et documents concernant ce sujet. En effet, il faut savoir que la précision des coefficients du modèle postulé est influencée par la position des points du plan d'expérience. Selon que les points sont bien ou mal placés, on peut obtenir les coefficients avec une bonne ou une mauvaise précision. Avec les plans à deux niveaux basés sur les matrices d'Hadamard (plans factoriels complets, fractionnaires et plans de Plackett et Burman), on est sûr que les points sont toujours bien placés. Avec les plans du second degré, il n'en est plus de même. Il faut choisir un critère de qualité pour les coefficients. En fonction de ce critère, on calcule la meilleure position possible des points d'expériences. On suppose que les points axiaux sont à la même distance (en grandeurs centrées réduites) du centre du domaine d'étude et cette distance est notée α .

Par exemple, on peut vouloir que l'erreur de prédiction soit la même pour des distances également

éloignées du centre du domaine. Dans ce cas, on choisit le critère d'iso-variance par rotation. La valeur de α est égale à :

$$\alpha = n_f^{1/4} \dots\dots\dots(24)$$

Si l'on veut que le plan composite satisfasse le critère d'isovariance par rotation il faut placer les points en étoile à une distance α égale à la racine quatrième du nombre de points du plan factoriel.

On peut vouloir que les coefficients répondent au critère de *presque-orthogonalité*, il faut alors choisir α tel que :

$$\alpha = \left(\frac{n_f (\sqrt{n_0 + n_f + n_\alpha} - \sqrt{n_f})^2}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots(25)$$

La valeur de α est fonction du nombre de points au centre, du nombre de points du plan factoriel et du nombre de points du plan en étoile. Le tableau II.13 ou II.15 permet de choisir la valeur de α pour les cas les plus souvent rencontrés

Tableau II.15 : Valeur de α en fonction du nombre de points factoriels (n_f), en étoile (n_α) et centraux (n_0) pour le critère de presque-orthogonalité

Nombre de facteurs	2	3	4	5	5	6	6
Plan	2^2	2^3	2^4	2^{5-1}	2^5	2^{6-1}	2^6
n_f	4	8	16	16	32	32	64
n_α	4	6	8	10	10	12	12
$n_0 = 1$	1	1,215	1,414	1,547	1,596	1,724	1,761
$n_0 = 2$	1,078	1,287	1,483	1,607	1,662	1,784	1,824
$n_0 = 3$	1,147	1,353	1,547	1,664	1,724	1,841	1,885
$n_0 = 4$	1,210	1,414	1,607	1,719	1,784	1,896	1,943
$n_0 = 5$	1.607	1.664	1.719	1.724	1.770	1.943	1.950

II.6.3 Organigramme du plan d'expériences

L'organigramme représente un aperçu détaillé de la démarche de traitement des plans d'expériences [Iouvet, 2005].

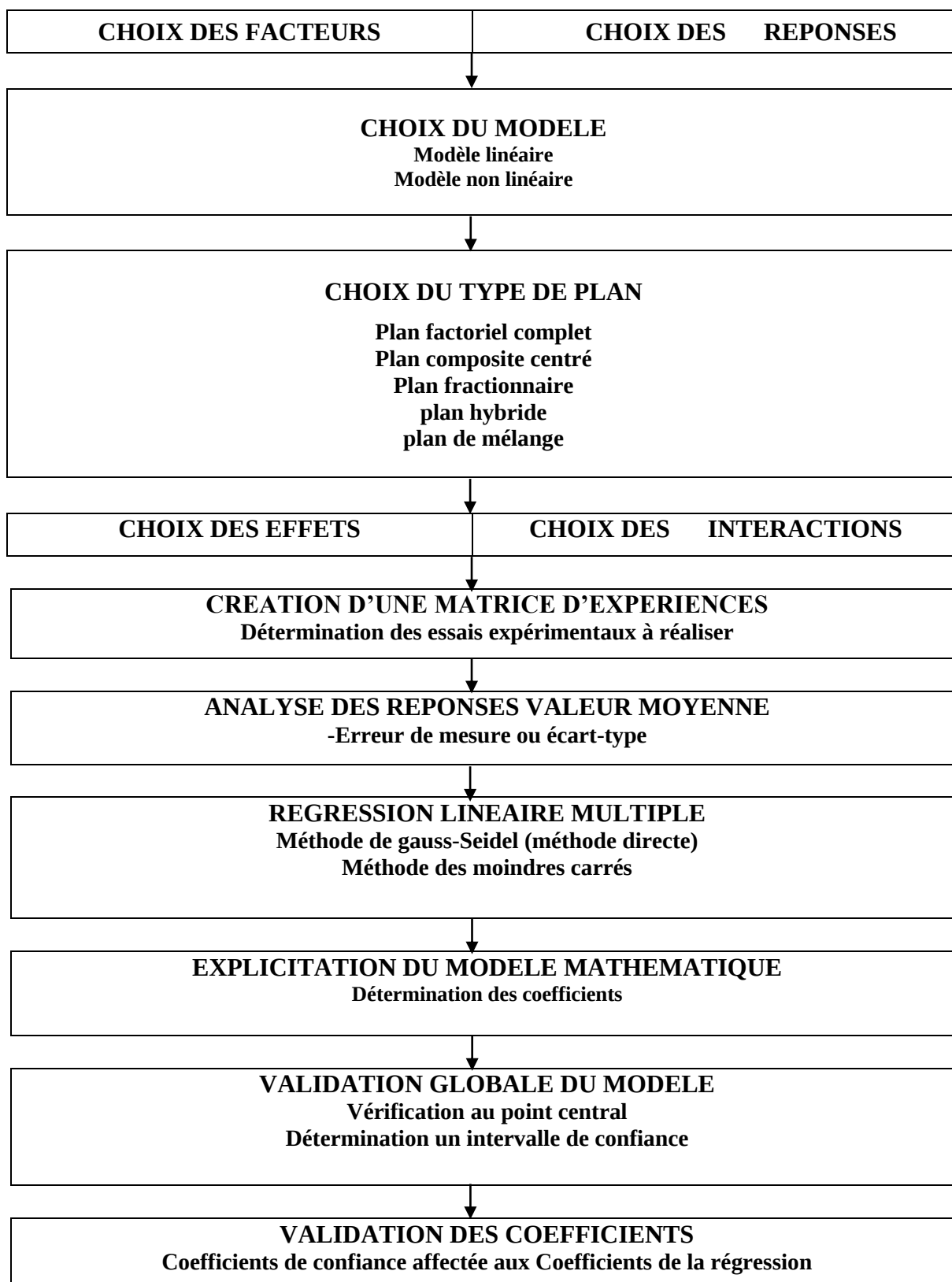


Fig. II.26 : Organigramme de plans d'expériences

CHAPITRE III

DEVELOPPEMENT D'UN PLAN FACTORIEL POUR L'OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BSD

DEVELOPPEMENT D'UN PLAN FACTORIEL POUR L'OPTIMISATION DU BSD

III.1 FORMULATION DES BETONS DE SABLE

III.1.1 INTRODUCTION

L'étude de formulation d'un béton, consiste à déterminer les proportions des différents composants d'un béton afin de satisfaire aux exigences du CPS en matière de maniabilité et de résistance. Dans le cas de béton de sable, l'étude diffère des méthodes graphiques adoptées pour les bétons ordinaires, comme la méthode de FAURY ou DREUX-GORISSE.

Pour les bétons de sable, la formulation se base sur l'optimisation du squelette granulaire, la démarche de cette formulation demeure très empirique. Différentes approches ont été envisagées pour appréhender les caractéristiques de résistance. Par contre la prise en compte de l'ouvrabilité comme critère de formulation demeure complexe. Un béton de sable, confectionné essentiellement de sable dont la surface spécifique est très grande, a besoin davantage d'eau et de ciment. Or l'influence négative d'un fort dosage en ciment sur le coût et d'un fort dosage en eau sur les caractéristiques mécaniques et sur le retrait est bien connue. Il est donc judicieux de remplacer une partie du ciment par des fillers et limiter le dosage en eau par l'ajout des adjuvants. Enfin nous pouvons dire que pour formuler un béton de sable, il faut combiner les deux paramètres : maniabilité et compacité.

La méthode que nous avons utilisée est SABLOCRETTE [SABLOCRETTE, 1994] ; décrite en chapitre I.

III.1.2 FORMULATION DE LA COMPOSITION CENTRALE DU PLAN

Formuler une composition de base :

- Estimation de dosage en fines : ciment + filler
 $[Fines] = 0.38(0.08/D)^{1/5}$.
 $D = 0.8\text{mm}$.
 $[Fines] = 239 \text{ l/m}^3$.
- Porosité et dosage en eau :
 $[e+v] = 0.8(d/D)^{1/5}$.
 $d = 60/4200 \times 3.1 = 0.0046\text{mm}$.

$$[e+v]=285 \text{ l/m}^3.$$

- Volume d'air : le béton contient toujours un volume d'air, dans le cas de béton de sable, la teneur en air est de l'ordre de 3 à 5%.
On prend une valeur moyenne de 4%.
Soit 40 l/m^3 .
- Volume d'eau :
 $[e+v]=285 \text{ l/m}^3$ avec $[v]=40 \text{ l/m}^3$.
Le dosage en eau= 245 l/m^3 .
- Estimation du dosage en sable :
 $[\text{Sable}]=1000-[\text{fine}]-[\text{eau}]-[\text{vide}]=476 \text{ l/m}^3$.
Soit avec une densité de 2.65.
 $[\text{Sable}]=476 \times 2.65 = 1261 \text{ kg/m}^3$.
- Le dosage en ciment : nous avons fixé le dosage en ciment à 450 kg/m^3 afin de minimiser le volume d'air occlus.

Finalement, les différents dosages à étudier sont :

- Sable de dune : 1261 kg/m^3 .
- Ciment : 450 kg/m^3 .
- Filler : 254 kg/m^3 .
- Eau : 245 l/m^3

Cette composition nous l'avons essayé expérimentalement pour l'ajuster ; en premier lieu nous avons visé l'état frais du béton : donc une bonne maniabilité et une masse volumique admissible, après plusieurs gâchées et l'introduction d'un adjuvant super plastifiant à différents dosages ; celle avec un dosage de 1% de masse de liant en superplastifiant a été retenue et qui a donné un béton dant les caractéristiques à l'état frais :

- Mesure de la masse volumique 21875 kg/m^3 .
- Mesure de la plasticité au cône d'Abrams : 15 cm .
- Mesure de la température du béton : $27.6 \text{ }^\circ\text{C}$.
- $E/C = 0.54$.

III.1.3 OBJECTIF DE LA RECHERCHE

La formulation du béton de sable de dune repose sur l'optimisation du squelette solide, pour améliorer la maniabilité de mélange sans altérer les performances mécaniques.

Sachant que les sables de dunes sont des matériaux très fins, propres, monogranulaire et de nature siliceuse. Ils se caractérisent par une importante porosité intergranulaire, une surface spécifique élevée et un faible module de finesse. Ces trois dernières caractéristiques, affectent leurs aptitudes à être utilisés telsquels dans les mortiers et bétons ;

1. Consistance médiocre (donc mauvaise maniabilité) ;
2. Compacité du mélange granulaire assez réduite ;
3. Demande en eau de mouillage important.

Pour suppléer à ces insuffisance on procède ainsi :

- ⤴ Une correction granulaire dans le but de relever le module de finesse en combinant le sable de dune très fin avec un sable d'oued relativement plus grossier ;
- ⤴ Une incorporation de fines telqu'un filler calcaire pour accroître la compacité par remplissage des vides intergranulaire ;
- ⤴ L'ajout d'un adjuvant superplastifiant haut reducteur d'eau pour améliorer la maniabilité (tout en gardant la quantité d'eau de gâchage constante) ;
- ⤴ La substitution d'une partie du ciment par un laitier de haut fourneau finement broyé.

Pour étudier l'influence de chaque élément et son interaction avec les autres, à partir des méthodes classiques d'expérimentation, on se retrouvera avec un nombre important d'essais à réaliser, ce qui dépasse les limites du faisable. D'où nous avons opté pour la méthode statique dite plan d'expérience qui donne l'avantage de faire varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience, mais de manière structurée. Ces plans composites centrés permettent de prendre en considération les trois facteurs, chacun étant étudié à cinq niveaux distincts (en valeurs codées) soit $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$.

III.2. PREPARATION D'UN PLAN D'EXPERIENCES

Vu la diversité des matériaux utilisés dans la formulation du béton de sable de dune, plusieurs gâchées sont nécessaires pour établir un équilibre entre les différents paramètres pour atteindre les propriétés spécifiées. Les trois paramètres clés de mélange pouvant avoir une influence significative

sur les propriétés du béton de sable de dune ont été sélectionnés pour modéliser les propriétés pertinentes du BSD. Les trois paramètres étudiés sont, la teneur en filler calcaire (F_c), le rapport massique de sable mélange (alluvionnaire-dunaire) (SA/SD), et le dosage en laitier des hauts fourneaux substitué au ciment.

Le rapport E/C reste constant ($E/C=0.54$) ainsi que le dosage en liant (450 kg/m^3).

Le dosage en superplastifiant est déterminé pour avoir un béton assez maniable. Cependant, nous avons toléré un affaissement de 05 à 15 cm dénotant un béton de la limite de plasticité à la limite de fluidité.

Les réponses modélisées sont :

- L'affaissement au cône d'Abrams (A_{ff}), en cm ;
- La teneur en air (A) en % ;
- Les masses volumiques (M_v);
- La résistance à la compression à 7 et 28 jours (R_c);
- La résistance à la flexion à 7 et 28 jours (R_t);
- Le retrait libre (R_{te}).

Notre travail vise à formuler un béton de sable assez performant à l'état frais comme à l'état durci, c'est-à-dire une maniabilité satisfaisante et une bonne résistance mécanique.

III.2.1. CHOIX DES FACTEURS MODELISES

Les facteurs sélectionnés ont des effets importants sur le comportement du béton de sable. Le plan d'expérience permet le développement d'un modèle mathématique décrivant l'influence de chaque facteur.

Un plan factoriel 2^3 a été conçu pour évaluer l'influence de ces trois facteurs étudiés (F_c , SA/SD , LHF/C) sur les propriétés du béton de sable de dune BSD. Le niveau de chaque facteur est évalué à deux niveaux différents : un minimum et un maximum pour établir des modèles linéaires. Vu la variation non linéaire des réponses en fonction des variables choisies, le domaine expérimental est élargie pour concevoir un plan central composite et permettre la modélisation des réponses de façon quadratique.

À partir des méthodes d'expérimentation classique, si on veut étudier ces trois facteurs avec 05 différents niveaux (plan composite), on se trouve avec un très grand nombre d'essais à

réaliser, ce qui dépasse les limites du faisable. La différence capitale de la méthode statistique avec la méthode classique tient au fait que l'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience, mais de manière structurée. Ces plans composites centrés permettent de prendre en considération les trois facteurs, chacun étant étudié à cinq niveaux distincts (en valeurs codées) soit $(-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha)$.

Si l'on veut que le plan composite satisfasse le critère *presque-orthogonalité*, la valeur de α est calculée comme fonction du nombre de points factoriels (voir l'équation V.1), de points axiaux et de points centraux. Dans le cas d'un plan orthogonal avec trois points centraux, la valeur de α est prise égale à $\pm 1,353$ [Sado G; 1991] selon la formule suivante :

$$\alpha = \left[\frac{n_f(\sqrt{n_0+n_f+n_\alpha}-\sqrt{n_f})^2}{4} \right]^{1/4} \dots\dots\dots(25)$$

où n_f représente le nombre de points factoriels, le n_α est le nombre de points axiaux et n_0 est le nombre de points centraux. Dans le cas de trois variables indépendantes ($k = 3$), un plan de PCC se compose de huit ($n_f = 2k$) points factoriels et de six ($6 = 2k$) points axiaux à un α de distance de l'origine du domaine expérimental.

III.2.2 FORMULATIONS UTILISEES POUR ETABLIR LES MODELES QUADRATIQUES

Les formulations des mélanges utilisés pour développer les modèles quadratiques sont présentées dans le tableau III.1. Ces mélanges consistent en 8 mélanges du plan factoriel (valeurs entre -1 et +1), 6 mélanges en étoile (valeurs entre -1,353 et +1,353) et les mélanges au centre du domaine expérimental pour estimer le degré d'erreur expérimental pour les différents modèles.

Les modèles développés sont valables pour les niveaux de facteurs entre -1,353 et +1,353, à savoir 129.41 à 210.6 kg/m³ pour le dosage en filler calcaire FC, 1.023 à 2.376 pour le rapport SA/SD, 0.03 à 0.5 pour le rapport LHF/C, 3% à 33.3% pour le dosage en laitier LHF et enfin de 435.65 à 300.35 pour le dosage en ciment. Il est recommandé de limiter l'emploi des modèles à l'intérieur du cercle de rayon 1,353 dans le but de réduire l'erreur qui augmente lorsque le rayon du cercle augmente.

Tableau III.1 : Valeurs codées et absolues pour les facteurs étudiés

	Paramètres (Facteurs)				
	FC (kg/m ³)	SA/SD	LHF/C	LHF	Ciment (kg/m ³)
Niveau (-1,353)	129,41	1,023	0,03	3%	435,65
Niveau bas (-1)	140	1,2	0,07	7,1%	418
Centre	170	1,7	0,23	18,2%	368
Niveau haut (+1)	200	2,2	0,40	29,3%	318
Niveau (+1,353)	210,6	2,376	0,50	33,3%	300,35

III.2.3 PRESENTATION DES RESULTATS

Le modèle mathématique associé à un plan composite centré à trois facteurs se présente comme suit :

$$Y = a_0 + a_1FC + a_2SA/SD + a_3LHF/C + a_{12}FC.SA/SD + a_{13}FC.LHF/C + a_{23}SA/SD.LHF/C + a_{11}FC^2 + a_{22}SA/SD^2 + a_{33}LHF/C^2 + e$$

Où les coefficients (a_i et a_{ij}) sont les contributions des facteurs et leurs interactions sur les modèles établis.

Ces coefficients sont déterminés par des régressions multilinéaires. Ces valeurs représentent la gamme fonctionnant proposée pour étudier l'effet des proportions de mélange sur le comportement mécaniques du béton étudié.

Tableau III.2 : Variables codées des 17 mélanges utilisés.

	Configuration	Dosage en filler calcaire (FC)	Rapport (LHF/C)	Type de sable SA/SD
BSD₁	+--	1	-1	-1
BSD₂	--+	-1	-1	1
BSD₃	-+-	-1	1	-1
BSD₄	-++	-1	1	1
BSD₅	+ - +	1	-1	1
BSD₆	++-	1	1	-1

BSD₇	000	0	0	0
BSD₈	---	-1	-1	-1
BSD₉	+++	1	1	1
BSD₁₀	000	0	0	0
BSD₁₁	000	0	0	0
BSD₁₂	$\alpha 00$	1,353	0	0
BSD₁₃	$-\alpha 00$	-1,353	0	0
BSD₁₄	$0\alpha 0$	0	1,353	0
BSD₁₅	$0-\alpha 0$	0	-1,353	0
BSD₁₆	00α	0	0	1,353
BSD₁₇	$00-\alpha$	0	0	-1,353

Après passage des variables codées aux variables réelles, le plan d'expérience correspondant aux proportions des mélanges du béton de sable de dune étudiés est alors donné dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Proportions des 17 mélanges du béton de sable de dune

N°	Sable de dune (kg/m ³)	Sable alluvionnaire (kg/m ³)	Filler de calcaire FC (kg/m ³)	Micro filler LHF (kg/m ³)	Ciment CEM II	Eau (L)	E/C	SA/SD
BSD₁	573,18	687,82	200	32	418	225,72	0,54	1.2
BSD₂	573,18	687,82	140	32	418	225,72	0,54	1.2
BSD₃	394,06	866,94	140	132	318	171,72	0,54	2.2
BSD₄	394,06	866,94	140	132	318	171,72	0,54	2.2
BSD₅	573,18	687,82	200	32	418	225,72	0,54	1.2
BSD₆	394,06	866,94	200	132	318	171,72	0,54	2.2
BSD₇	467,04	793,96	170	82	368	198,72	0,54	1.7

BSD₈	573,18	687,82	140	32	418	225,72	0,54	1.2
BSD₉	573,18	687,82	200	132	318	171,72	0,54	2.2
BSD₁₀	467,04	793,96	170	82	368	198,72	0,54	1.7
BSD₁₁	467,04	793,96	170	82	368	198,72	0,54	1.7
BSD₁₂	467,04	793,96	210,6	82	368	198,72	0,54	1.7
BSD₁₃	467,04	793,96	129,4	82	368	198,72	0,54	1.7
BSD₁₄	887.90	373.10	170	149,65	300,35	162,19	0,54	2,38
BSD₁₅	636.74	624.26	170	14,35	435,65	235,25	0,54	1,02
BSD₁₆	467,04	793,96	170	82	368	198,72	0,54	1.7
BSD₁₇	467,04	793,96	170	82	368	198,72	0,54	1.7

III.2.4 RESULTATS DES ESSAIS ET DISCUSIONS

Les résultats des essais des 17 bétons employés dans le plan factoriel sont récapitulés dans les tableaux III.4 et III.5. Pour les mélanges proportionnés, le dosage en superplastifiant a été ajusté pour obtenir un béton maniable.

Les résultats présentés dans le tableau III.6 permettent de comparer l'effet des divers paramètres et leurs interactions sur les propriétés du BSD. À l'exception de quelques interactions entre certains paramètres, il y a au moins 95% de chance que le coefficient contribuant à la prédiction de la réponse soit précis. Une estimation négative signifie que le paramètre participe à la diminution de la valeur de la réponse.

Tableaux III.4 : Proportions des mélanges et propriétés des 17 mélanges utilisés (à l'état frais)

N°	Sable D (kg/m ³)	Sable A (kg/m ³)	Filler calcaire FC (kg/m ³)	Micro filler LHF (Kg/m ³)	Ciment CEM II	Eau(L)	Sp(%)	E/C	Aff. (cm)	Masse volumique (t/m ³)	Air occlu (%)
BSD1	573,18	687,82	200	29,3	418	225,7	0.7	0,54	12	2.23	8
BSD2	573,18	687,82	140	127,2	318	171,7	2.5	0,54	5	2.27	12
BSD3	394,06	866,94	140	29,3	418	225,7	1.3	0,54	11	2.24	9
BSD4	394,06	866,94	140	127,2	318	171,7	2.5	0,54	15	2.24	8
BSD5	573,18	687,82	200	127,2	318	171,7	2.5	0,54	9	2.24	10
BSD6	394,06	866,94	200	29,3	418	225,7	1.3	0,54	7	2.27	10
BSD7	467,04	793,96	170	84,6	368	198,7	1.5	0,54	6	2.27	10
BSD8	573,18	687,82	140	29,3	418	225,7	1.3	0,54	14	2.19	11
BSD9	573,18	687,82	200	127,2	318	171,7	2.5	0,54	5	2.21	10
BSD10	467,04	793,96	170	84,6	368	198,7	1.5	0,54	6	2.27	10
BSD11	467,04	793,96	170	84,6	368	198,7	1.5	0,54	6	2.27	10
BSD12	467,04	793,96	210,6	84,6	368	198,7	2	0,54	7	2.22	9
BSD13	467,04	793,96	129,4	84,6	368	198,7	1	0,54	6	2.22	13
BSD14	373.10	887.90	170	84,6	368	198,7	2	0,54	8	2.27	9

BSD15	636,74	624,26	170	88,8	386	208,4	1.5	0,54	6	2.27	9
BSD16	467,04	793,96	170	150,2	300,35	162,2	3.5	0,54	5	2.28	11
BSD17	467,04	793,96	170	13,1	435,65	235,3	1.3	0,54	13	2.25	7

Tableaux III.5 Proportions des mélanges et propriétés des 17 mélanges utilisés (à l'état durci)

N°	Sable D (kg/m ³)	Sable A (kg/m ³)	Filler calcaire FC (kg/m ³)	Micro filler LHF (kg/m ³)	Ciment CEM II	Eau (L)	E/C	Sp (%)	Rc07 (MPa)	Rc28 (MPa)	Rt07 (MPa)	Rt28 (MPa)	Ret7 j µm/m	Ret28j µm/m
BSD1	573,18	687,82	200	29,3	418	225,7	0,54	0.7	17.4	21.6	2.94	4.11	329	906
BSD2	573,18	687,82	140	127,2	318	171,7	0,54	2.5	13.4	20.1	2.22	3.62	356	998
BSD3	394,06	866,94	140	29,3	418	225,7	0,54	1.3	17.0	24.3	2.15	3.10	232	727
BSD4	394,06	866,94	140	127,2	318	171,7	0,54	2.5	21.1	31.9	5.34	5.72	274	855
BSD5	573,18	687,82	200	127,2	318	171,7	0,54	2.5	20.3	28.9	5.68	6.61	386	1052
BSD6	394,06	866,94	200	29,3	418	225,7	0,54	1.3	19.0	26.3	4.32	4.98	296	796
BSD7	467,04	793,96	170	84,6	368	198,7	0,54	1.5	19.1	27.1	3.45	4.91	305	810
BSD8	573,18	687,82	140	29,3	418	225,7	0,54	1.3	10.7	12.2	3.60	4.50	294	801
BSD9	573,18	687,82	200	127,2	318	171,7	0,54	2.5	19.2	25.8	3.85	5.30	398	1092
BSD10	467,04	793,96	170	84,6	368	198,7	0,54	1.5	19.1	27.1	3.45	4.91	305	810
BSD11	467,04	793,96	170	84,6	368	198,7	0,54	1.5	19.1	27.1	3.45	4.91	305	810

BSD12	467,04	793,96	210,6	84,6	368	198,7	0,54	2	19.5	29.8	3.8	5.05	385	956
BSD13	467,04	793,96	129,4	84,6	368	198,7	0,54	1	12.5	19.7	2.03	3.86	264	765
BSD14	373.10	887.90	170	84,6	368	198,7	0,54	2	20.4	30.5	2.50	4.36	308	825
BSD15	636.74	624.26	170	88,8	386	208,4	0,54	1.5	18.6	22.4	3.57	5.44	374	999
BSD16	467,04	793,96	170	150,2	300,35	162,2	0,54	3.5	13.2	15.3	1.57	2.66	378	1036
BSD17	467,04	793,96	170	13,1	435,65	235,3	0,54	1.3	17.4	20.1	3.43	4.56	248	755

Tableau III.6 : Paramètres estimés des différents modèles développées (linéaires et quadratiques)

Réponses de la variable	Résistance à la compression R_{c7} (MPa) $R^2 = 0.79$		Résistance à la compression R_{c28} (MPa) $R^2 = 0.80$		Résistance à la compression R_{t7} (MPa) $R^2 = 0.64$		Résistance à la compression R_{t28} (MPa) $R^2 = 0.60$	
	Estimation	Prob. > t	Estimatio	Prob. > t	Estimation	Prob. > t	Estimation	Prob. > t
Constante	18,58	<,0001	26,03	<,0001	3,04	0,0006	4,67	<,0001
FC	1,98	0,0062	2,38	0,0473	0,50	NS	0,48	0,0718
FC*FC	-1,05	NS	0,05	NS	0,21	NS	0,05	NS
LHF/C	1,45	0,0291	3,12	0,0152	-0,02	NS	-0,10	NS
LHF/C*LHF/C	0,86	NS	0,97	NS	0,28	NS	0,29	NS
SA/SD	0,36	NS	1,35	NS	0,13	NS	0,17	NS
SA/SD*SA/SD	-1,43	NS	-3,80	0,0220	-0,01	NS	-0,41	NS
FC*LHF/C*SA	-	-	--	NS	-0,97	0,0291	-0,71	0,0358
FC*LHF/C	-1,69	0,0341	-2,78	0,0529	-0,265	NS		
Réponses du variable	Retrait à 07 jours($\mu\text{m}/\text{m}$) $R^2 = 0.96$		Retrait à 28 jours($\mu\text{m}/\text{m}$) $R^2 = 0.98$		Affaissement(cm) $R^2 = 0.89$		Masse volumique (t/m^3) $R^2 = 0.98$	
	Estimation	Prob. > t	Estimatio	Prob. > t	Estimation	Prob. > t	Estimation	Prob. > t
Constante	310,72	<,0001	821,00	<,0001	5,61	0,0012	2,27	<,0001
FC	35,73	0,0003	62,03	0,0002	-0,91	NS	0,00	NS
FC*FC	3,50	NS	13,85	NS	0,75	NS	-0,02	<,0001
LHF/C	-21,80	0,0036	-44,79	0,0014	0,06	NS	0,00	NS
LHF/C*LHF/C	12,52	NS	41,99	0,0073	1,03	NS	-0,00	NS
SA/SD	37,63	0,0002	98,37	<,0001	-1,78	0,0171	0,00	0,0109
SA/SD*SA/SD	-2,77	NS	32,97	0,0204	2,12	0,0258	-0,00	NS
FC*LHF/C*SA	8,12	NS	27,37	0,0297	-1,5	NS	0,00	NS
FC*LHF/C	15,37	0,0356	18,37	NS	-2	0,0231	-0,00	NS
LHF/C*SA/SD	3,12	NS	10,12	NS	1,75	0,0379	-0,01	<,0001
FC*SA/SD	6,87	NS	14,62	NS	0	NS	-0,01	0,0002

Réponses du variable	Air occlus(%) $R^2 = 0.76$	
Paramètre	Estimation	Prob. > t
Constante	9,91	<,0001
FC	-0,63	NS
FC*FC	0,65	NS
LHF/C	-0,34	NS
LHF/C*LHF/C	-0,43	NS
SA/SD	0,63	NS
SA/SD*SA/SD	-0,43	NS
FC*LHF/C*SA	0	NS
FC*LHF/C	1	0,0399
LHF/C*SA/SD	-0,5	0,2483

* : Influence Significative

NS : Influence Non Significative.

III.2.4.1 Développement des modèles statistiques

L'analyse statistique permet de tirer des informations sur les facteurs et les interactions qui ont une influence statistiquement significative sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BSD. Un paramètre ou une interaction a une influence statistiquement significative lorsque son effet sur la réponse est suffisamment important pour affirmer son influence sur la réponse avec le minimum d'erreur possible. La méthodologie de l'analyse mathématique consiste à établir un modèle mathématique pour chacune des réponses observées. Ces dernières sont dans le cas de ce travail les grandeurs rhéologiques et mécaniques (affaissement, air occlus, résistance à la compression, résistance à la flexion, masse volumique, et retrait libre).

Dans cette partie nous allons aborder en détails la méthodologie utilisée pour modéliser les effets des facteurs et des interactions qui ont un degré de signification important sur les réponses étudiées.

La première étape consiste à entrer les 17 valeurs de la réponse mesurée dans le logiciel. Ce dernier génère un modèle avec l'ensemble des effets, sans aucune distinction dans leur degré de signification. La deuxième étape est l'estimation et la significativité des coefficients. Celles-ci consistent à éliminer au fur et à mesure les facteurs et les interactions présentant un effet le moins significatif en termes de valeurs. En outre, dans ce travail de recherche, l'intervalle de confiance dans lequel la valeur réelle de la réponse possède une forte probabilité de se trouver est de 95%. Ce qui signifie qu'un paramètre ou /et une interaction sont jugés influant et seront retenus si $\text{Prob.} > |t|$ est inférieur ou égal à 5 %. Après analyse, le modèle résultant est pris en considération.

L'étape suivante consiste à évaluer la qualité descriptive et prédictive du modèle pour savoir si ce dernier résume bien les résultats des essais du plan d'expérience. Quatre techniques sont décrites pour effectuer cette évaluation : l'examen graphique des résultats, l'analyse des variances, les tests statistiques, l'analyse des résidus.

La distribution utilisée dans l'analyse de la variance est celle de *Studentt*, c'est-à-dire une courbe de Gauss aplatie, puisqu'elle tient compte du degré de confiance de l'estimation et du nombre de degré de liberté avec lesquels l'erreur est évaluée.

Les modèles développés, pour l'ensemble des réponses étudiées, ainsi que leurs coefficients de corrélation et leurs $\text{Prob.} > |t|$ sont présentés dans le tableau III.6.

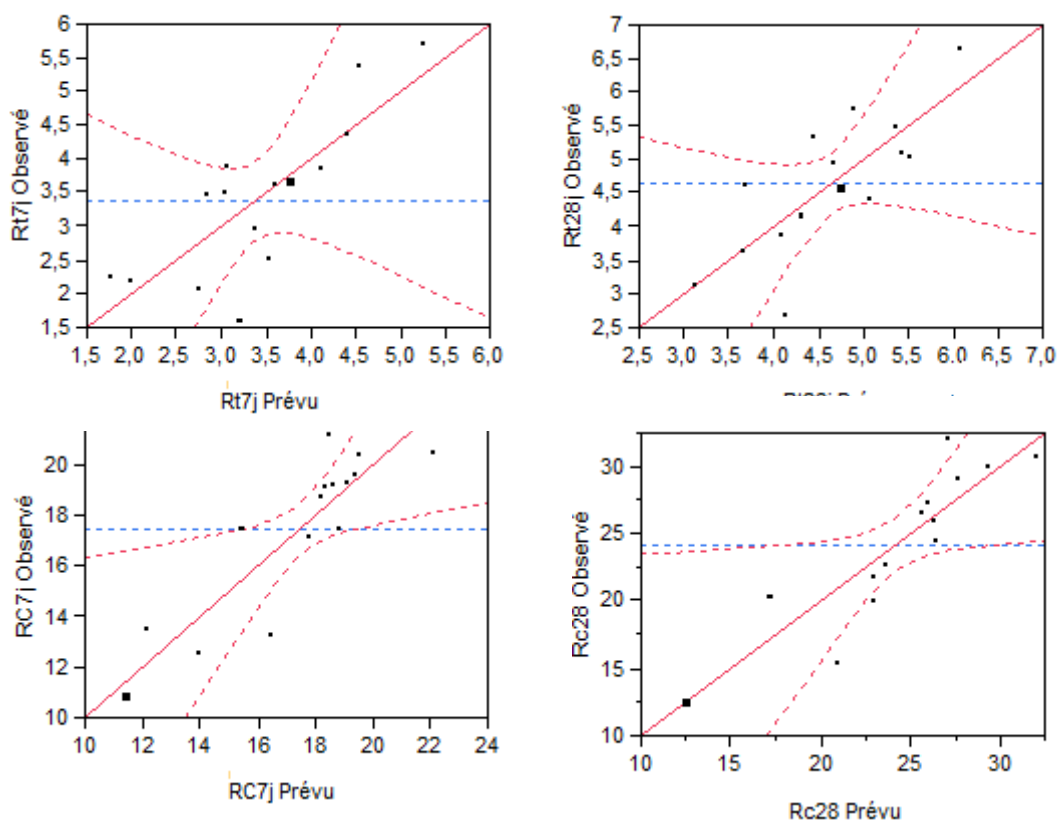
La $\text{Prob.} > |t|$ est la probabilité d'obtenir un plus grand événement statistique, en valeur absolue. Des modèles dérivés ont été établis pour des valeurs de probabilité inférieure à 10 pour des limites de confiance de 90 %, qui sont souvent considérés comme des preuves significatives et que le paramètre n'est pas nul, c'est à dire que la contribution du paramètre proposé a une influence très importante sur la réponse mesurée . L'importance de chaque facteur sur le modèle de la réponse donnée est étudiée en utilisant le test de signification des effets test de *Student t* [Montgomery.D.C., 2005 ; Sonebi et coll., 2005 ; Box EP, 1978]. Le R^2 des modèles établis pour la résistance à la compression à 07 et 28 jours, la résistance à la traction par flexion à 07 et 28 jours, le retrait libre à 07 et 28 jours, l'affaissement, la masse volumique et le pourcentage d'air occlus sont respectivement : 0.79, 0.80, 0.64, 0.60, 0.96, 0.98, 0.89, 0.98, 0.75. Pour la majorité des modèles, les valeurs élevées de R^2 démontrent que les corrélations sont très bonnes pour les modèles présentés.

III.2.4.2 Validité des modèles proposés

On remarque que les modèles adaptés ont présenté des coefficients de corrélation relativement élevés (tableau III.6) dont la validité doit être vérifiée. Les résultats de trois points centraux inclus dans le plan d'expériences ont été analysés afin d'estimer l'erreur expérimentale [Yahia et coll. , 2001].

La figure III.1 présente la relation entre les valeurs prévues et celles mesurées des réponses étudiées avec un intervalle de confiance de 95 % (courbes en rouge pointillées). Généralement, lorsque les droites des moyennes (en bleu) ne seront pas complètement couvertes par les courbes des intervalles de confiances à 95 %, on peut conclure que les modèles représentent bien les résultats expérimentaux [Goupy , 2007].

Sur la figure III.1 est représentée l'évolution des valeurs expérimentales (observées) en fonction des valeurs prédites (prévues) pour la R_{c07} , R_{c28} , R_{t07} , R_{t28} , R_{et07} , R_{et28} , A_{ff} , M_v et % Air occlus. Les courbes d'adéquation des modèles étudiés confirment que les modèles présentent des qualités descriptives très importantes. En effet, les nuages de points des réponses étudiées et obtenus à partir des valeurs mesurées et calculées par les modèles sont quasi alignés sur la première bissectrice avec des coefficients de corrélation acceptable (de 0.95 à 0.60).



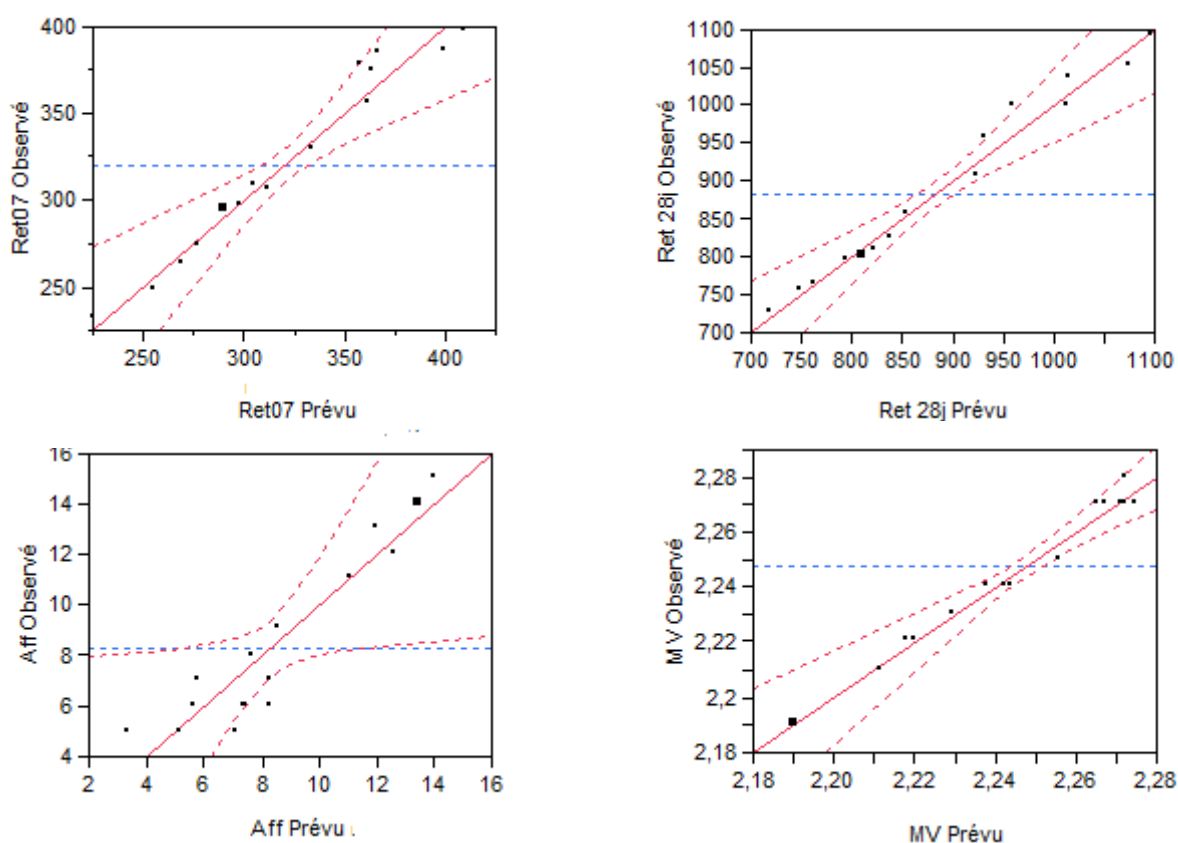


Figure III.1 : Représentation des réponses en fonction des valeurs prédites par le modèle pour Rc7, Rc28, Rt7, Rt28, Ret7, Ret28, Aff, Mv et A%.

III.2.4.3 Modèles mathématiques

Le traitement du plan d'expérience fournit les valeurs des coefficients des modèles développés.

D'après le tableau III.6, les modèles proposés pour les différents coefficients des réponses Rc7, Rc28, Rt7, Rt28, Ret7, Ret28, Aff, Mv et %Air occlus s'écrivent sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + a_1 Fc + a_2 SA/SD + a_3 LHF/C + a_{12} Fc.SA/SD + a_{13} Fc.LHF/C + a_{23} SA/SD.LHF/C + a_{11} Fc^2 + a_{22} SA/SD^2 + a_{33} LHF/C^2$$

Les modèles statistiques retenus pour les réponses sur les BSD sont récapitulés dans le tableau III.7 avec leurs coefficients.

Tableau III.7 : Coefficients des modèles.

	Coefficients									
Réponses	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁₁	a ₁₂	a ₂₂	a ₁₃	a ₂₃	a ₃₃
R_{c7}	18.58	1.98	0.36	1.45	-1.05	--	-1.43	-1.69	--	0.86
R_{c28}	26.03	2.38	1.355	3.126	0.051	--	-3.80	-2.787	-1.0125	0.979
R_{t7}	3.044	0.50	0.134	-0.019	0.213	--	-0.013	-0.265	0.17	0.279
R_{t28}	4.67	0.48	0.17	-0.103	0.05	--	-0.41	--	--	0.29
R_{et07}	310.72	35.73	37.63	-21.81	3.51	6.87	-2.77	15.37	3.125	12.52
R_{et 28}	821.01	62.04	98.38	-44.79	13.86	14.62	32.98	18.37	10.12	41.99
A_{ff}	5.61	-0.91	-1.78	0.06	0.75	--	2.12	-2	1.75	1.03
M_v	2.27	--	--	--	-0.029	-0.016	-0.004	-0.012	-0.018	-0.0014
% A	9.91	-0.64	0.64	-0.34	0.66	--	-0.43	1	-0.5	-0.435

En plus de la constante, les modèles du plan pour les réponses étudiées s'écrivent à l'aide de 5 autres coefficients sur les 10 théoriquement disponibles. Les modèles ainsi simplifiés s'écrivent de la façon suivantes :

$$R_{c7}(\text{ MPa})= 18.58+1.98*FC +1.45*LHF/C -1.69*FC*LHF/C$$

$$R_{c28}(\text{ MPa})= 26.03+2.38*FC +3.126*LHF/C -3.80*SA/SD^2-2.787*FC*LHF/C$$

$$R_{t7}(\text{ MPa}) = 3.044- 0.97*FC*LHF/CSA/SD$$

$$R_{t28}(\text{ MPa}) =4.67+0.48*FC -0.71* FC*LHF/C*SA/SD$$

$$R_{et7}(\mu\text{m/m})= 310.72+35.73*FC +37.63*SA/SD-21.81*LHF/C +15.37*FC*LHF/C$$

$$R_{et28}(\mu\text{m/m})=821.01+62.04*FC +98.38*SA/SD-44.79*LHF/C + \\ 32.98*SA/SD^2+27.37*FC*LHF/C*SA/SD + 41.99LHF/C^2$$

$$A_{ff}(\text{ cm}) =5.61- 1.78*SA/SD+2.12*SA/SD^2-2*FC*LHF/C+1.75*SA/SD*LHF/C$$

$$M_v(\text{t/m}^3)=2.27 -0.029* FC^2-0.016*FC*SA/SD-0.018*SA/SD*LHF/C$$

$$A(\%)=9.91 +1*FC*LHF/C-0.5*SA/SD*LHF/C$$

Notons bien que :

- Les interactions doubles par exemple d'un facteur (FC*FC) indiquent que son influence est quadratique [Sonebi et coll., 2005] ;
- Les coefficients de signe négatif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable associé fait diminuer la réponse.
- Les coefficients de signe positif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable fait augmenter la réponse.

III.3 CONCLUSION

Les modèles développés utilisent l'approche du plan factoriel composite centré. Ils sont valables pour une large gamme de proportion de mélange avec un rapport SA/SD variant de 1 à 2.4, un dosage en filler calcaire de 130 à 210 kg/m³, un rapport LHF/C variant de 0 à 0.5. Les modèles fournissent un moyen efficace pour calculer les réponses moyennes, évaluent les effets des facteurs et les interactions entre facteurs clés de proportionnement de mélange et offrent une bonne prédiction des valeurs mesurées.

Bien que les modèles développés soient basés sur un ensemble donné de matière, ils peuvent être employés comme un moyen efficace pour comprendre l'influence de chaque paramètre sur le comportement du béton de sable de dune.

Ces modèles peuvent améliorer également le protocole des essais nécessaires pour optimiser un béton de sable de dune. Dans le chapitre suivant, on présente quelques exemples qui illustrent l'utilisation et l'exploitation de ces modèles. Des relations entre les diverses réponses sont aussi exposées afin de faciliter le protocole de caractérisation des bétons de sable de dune.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES DE MELANGE SUR LES CARACTERISTIQUES DES BETONS DE SABLE

INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES DE MELANGE SUR LES CARACTERISTIQUES DES BETONS DE SABLE

IV.1 INTRODUCTION

Les modèles mathématiques développées décrivent la signification relative de chaque variable et fournissent des informations clés pour l'optimisation du béton de sable de dune.

L'analyse des modèles développés permet l'identification des tendances majeures et prédit une meilleure orientation pour les études futures.

Dans ce chapitre on va étudier l'influence des trois paramètres de composition sur les caractéristiques des bétons de sable de dune BSD à savoir ; l'influence du dosage en filler calcaire, du rapport sable alluvionnaire / sable dunaire (SA/SD) et le dosage en laitier des haut-fourneau (ajout minéral substitué au ciment) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques exigées par l'utilisation des bétons.

IV.2 EXPLOITATION DES MODELES DEVELOPPES

Puisque le béton a un comportement non linéaire avec les paramètres mécaniques, les problèmes d'optimisation non linéaire devraient être résolus. Les surfaces de réponse analysent l'effet et la signification de chacun des facteurs qui ont été employés par plusieurs chercheurs pour trouver les solutions d'optimisation [Yahia et coll.2005 ; Soneibi.et coll.,2005].

Les différents modèles mathématiques, développés par la méthode des plans d'expériences, permettent de tracer des courbes iso-réponses afin de visualiser les effets des paramètres d'optimisation (dosage en filler, rapport SA/SD et le dosage en ajout substitué au ciment ,le laitier) dans les limites du domaine d'étude du plan et qui sont définies par les niveaux hauts et bas des facteurs, sur les réponses : les résistances à la compression R_{c7} et R_{c28} , résistance à la traction par flexion R_{t7} et R_{t28} , le retrait libre, l'affaissement, la masse volumique et le pourcentage d'air occlus dans le béton.

IV.2.1 BETON A L'ETAT DURCI

IV.2.1.1 RESISTANCES A LA COMPRESSION

A/ COURBES ISO-REPONSES

$$R_{c7}(\text{MPa}) = 18.58 + 1.98 \cdot FC + 1.45 \cdot \text{LHF/C} - 1.69 \cdot FC \cdot \text{LHF/C}$$

$$R_{c28}(\text{MPa}) = 26.03 + 2.38 \cdot FC + 3.126 \cdot \text{LHF/C} - 3.80 \cdot \text{SA/SD}^2 - 2.787 \cdot FC \cdot \text{LHF/C}$$

Les modèles développés, nous permettent de tracer les courbes iso-résistances à la compression à 07 et 28 jours d'âge de béton de sable de dune.

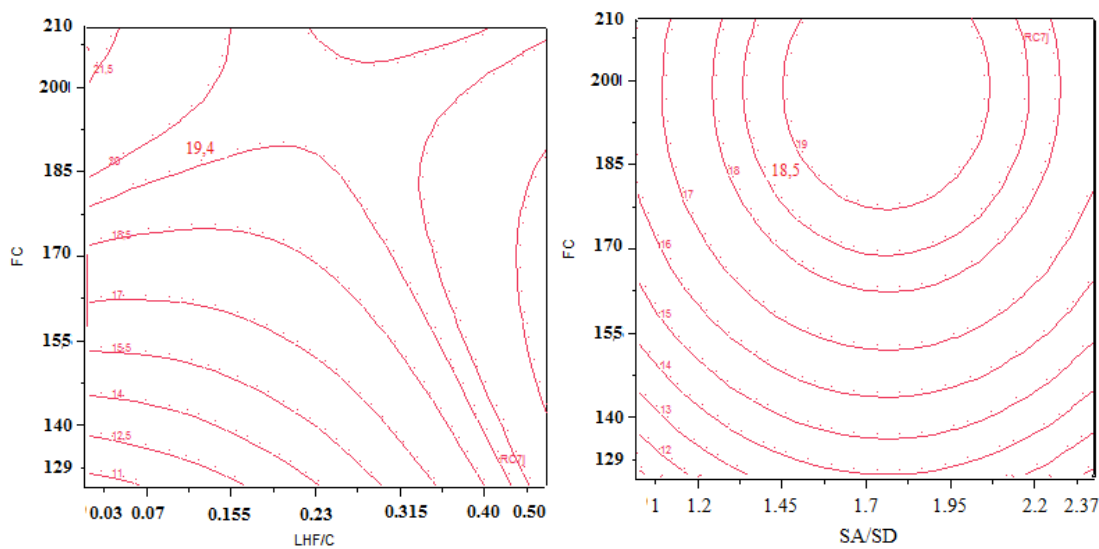


Fig.IV.1 : Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 07 jours d'âge de béton

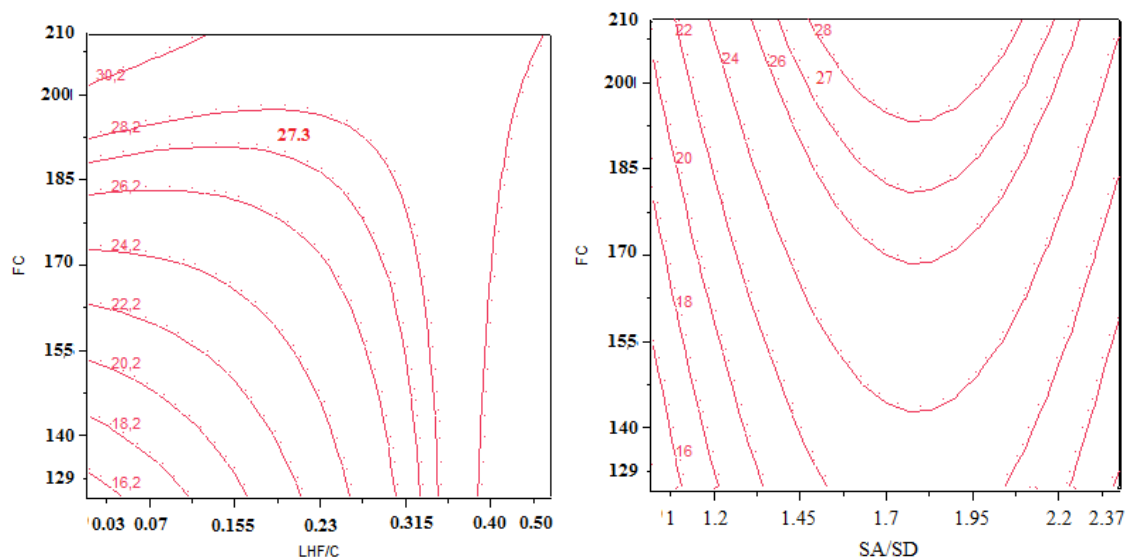


Fig.IV.2 : Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours d'âge de béton

COMMENTAIRE

Le modèle développé (voir chapitre III), nous permettent de tracer les courbes iso-résistances à la compression à 07 et 28 jours d'âge de béton. Les courbes iso-réponses, représentées dans les figures IV.1 et IV.2, montrent l'effet de la variation des paramètres [LHF/C] et [FC] sur la réponse résistance à la compression (R_{c7} et R_{c28}). Il montre que les deux facteurs [LHF/C] et [FC] ont des effets positifs sur la réponse, ainsi que leur augmentation à un effet quadratique sur la réponse dans le domaine d'étude.

A 7 jours d'âge de béton et d'après les courbes iso-réponse la résistance tend à augmenter en augmentant le dosage en filler calcaire et le dosage du LHF/C jusqu'à une valeur de substitution de 0.25 en laitier et un dosage de 185 kg/m³ de filler calcaire, si on dépasse ces valeurs combinées la résistance chutera.

Par exemple d'après la courbe si on augmente la valeur (le rapport) de LHF/C = 0.31, pour avoir la même résistance on doit réduire le dosage en filler à 175kg/m³.

A 28 jours d'âge de béton la même évolution ascendante de courbe comme précédemment pour (R_{c7}), la résistance augmente en augmentant le dosage en [LHF/C] et [FC] jusqu'à un seuil limite.

Les meilleurs résistances sont obtenues avec les combinaisons suivantes (FC=140kg/m³ et LHF/C=127.2, FC=210.6kg/m³ et LHF/C=84.6).

Tableau IV.1 : Effet combiné du dosage en filler calcaire et du dosage en laitier à rapport SA/SD constant à 07 jours.

	[LHF/C]=0.07	[LHF/C]=0.4
[FC]=140kg/m ³	10.7 MPa	13.4 MPa
[FC]=200kg/m ³	17.4 MPa	19.2 MPa

Tableau IV.2 : Effet combiné du dosage en filler calcaire et du dosage en laitier à rapport SA/SD constant à 28 jours.

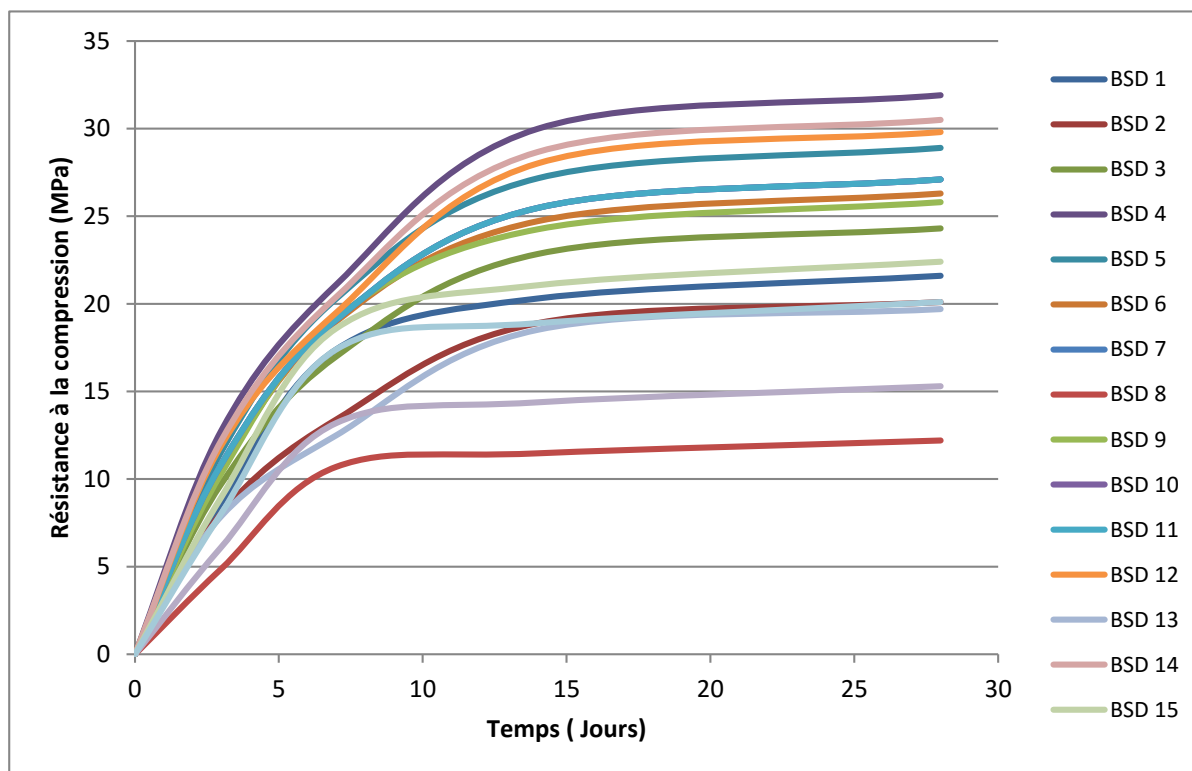
	[LHF/C]=0.07	[LHF/C]=0.4
[FC]=140kg/m ³	12.2 Mpa	20.1 Mpa
[FC]=200kg/m ³	21.6 Mpa	25.8 Mpa

Les courbes iso-réponses indiquent que la résistance à la compression évolue positivement avec l'ajout des fillers calcaires ce qui implique que le dosage en filler calcaire augmente la compacité du mélange par comblement des vides inter-granulaire ce qui induit une augmentation de la résistance du béton de sable BSD [M. Hadjoudja, 2014].

Cependant il est à noter que le but recherché par n'importe quelle méthode de formulation, est le dosage optimal en constituants. A ce propos, dans le cas de béton de sable, on doit chercher l'optimum en addition calcaire qui assure le comblement des vides de sable. Il faut bien saisir qu'un optimum ne doit pas être un minimum insuffisant ni un maximum nuisant. Dans notre cas, l'optimum en addition est d'environ 190 Kg/m³ pour une résistance à la compression d'environ 30.2MPa.

Pour ce qui est de rapport SA/SD, l'évolution de la résistance Rc va dans le même sens que ce dernier, même commentaire que pour les fillers calcaires, dans ce cas la compacité est aussi un facteur primordial dans l'amélioration des résistances mécaniques car elle est liée à la granulométrie de l'étendue granulaire. D'après les courbes notre optimum est de 1.8.

Le dosage en laitier a aussi un effet positif sur la résistance en compression grâce à la réactivité (même modéré laitier) à condition de ne pas dépasser un rapport de LHF/C égale à 0.25. On note que le laitier améliore notablement la durabilité du béton d'après plusieurs études qui montrent que l'incorporation du laitier dans un béton peut amener des effets bénéfiques comme un développement de chaleur d'hydratation plus lent, une microstructure de la pâte ciment hydratée plus dense, une bonne résistance aux eaux agressives, aux chlorures et aux sulfates, ce qui permet d'améliorer la résistance à long terme et en particulier la durabilité [Z. Boudaoud, 2002 ; D. Achoura, 2004].

B/ EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION**Fig. IV.3 : Développement de la résistance en compression dans le temps****COMMENTAIRE**

Sur la figure IV.3, les résistances sont présentées en fonction du temps, l'analyse de ces courbes montre le développement des résistances à la compression en fonction de l'âge de béton, cependant on peut remarquer que la formulation BS4 donne la meilleure résistance à la compression ($R_{c28}=31.9\text{MPa}$) avec sa formulation riche en laitier ($\text{LHC}/\text{C}=0.4$) et sa granulométrie étendue (un rapport $\text{SA}/\text{SD}=2.2$) et un dosage en filler calcaire de $140\text{kg}/\text{m}^3$. Également la composition BSD14 avec un maximum de sable alluvionnaire $\text{SA}/\text{SD}=2.37$ et un dosage en filler calcaire de ($170\text{kg}/\text{m}^3$). La formulation BSD5 contenant un dosage important en laitier ($\text{LHC}/\text{C}=0.4$) et un dosage optimal de filler calcaire ($200\text{kg}/\text{m}^3$) donne aussi une résistance à la compression assez importante (29MPa).

Il est à noter que la formulation BSD16 dont le dosage en laitier est le plus élevé $\text{LHF}/\text{C}=0.5$ donne les plus faibles résistances mécaniques ; le faible développement de la résistance pour le mélange à 50% de laitier peut être expliqué par la réactivité limitée (faible) du laitier utilisé.

IV.2.1.2 RESISTANCES A LA TRACTION PAR FLEXION

A/COURBES ISO-REPNSES

$$R_{t7}(\text{MPa}) = 3.044 - 0.97 \cdot FC \cdot LHF/C \cdot SA/SD$$

$$R_{t28}(\text{MPa}) = 4.67 + 0.48 \cdot FC - 0.71 \cdot FC \cdot LHF/C \cdot SA/SD$$

Les modèles développés, nous permettent de tracer les courbes iso-résistances à la traction à 07 et 28 jours d'âge de béton de sable de dune.

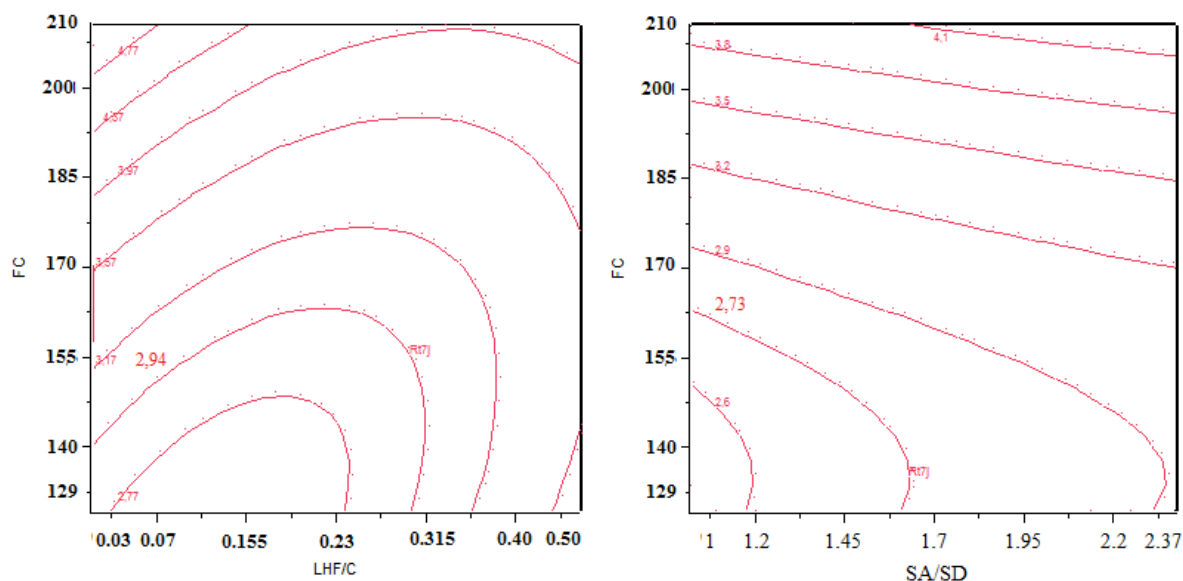


Fig. IV.4 : Courbes iso-réponses de la résistance à la traction à 07 jours d'âge de béton

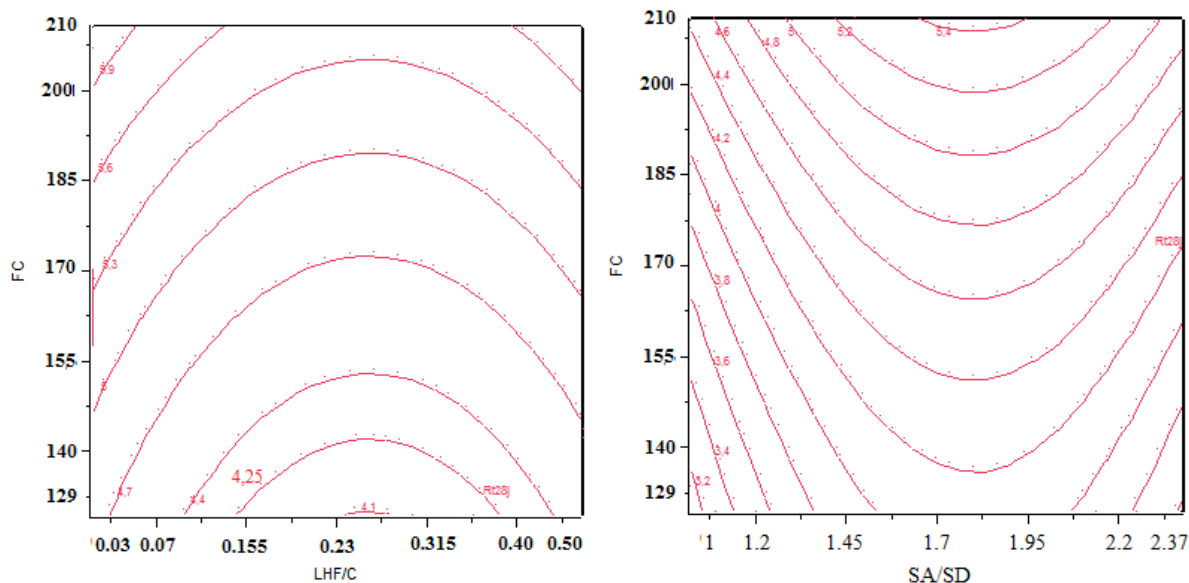


Fig. IV.5 : Courbes iso-réponses de la résistance à la traction à 28 jours d'âge de béton

DISCUSSION

Le comportement en flexion est similaire à celui à la compression, l'effet de dosage en filler calcaire [FC] prend le dessus, il a un effet positif sur la résistance à la traction par flexion.

Cette réflexion est confirmée par plusieurs recherches antérieures [I. AGUIDA, 2007].

La formulation BS5 à fort dosage en laitier (LHF/C=0.4) et un dosage optimale en filler qui donne les meilleures résistances que ce soit à la compression et à la traction.

Les formulations contenant des rapports SA/SD importants donnent également une certaine amélioration des résistances à la traction.

Les performances mécaniques, qu'ils s'agissent de la résistance à la compression ou à la traction sont affectées par le surdosage en laitier (50% et plus) qui diminue significativement la résistance.

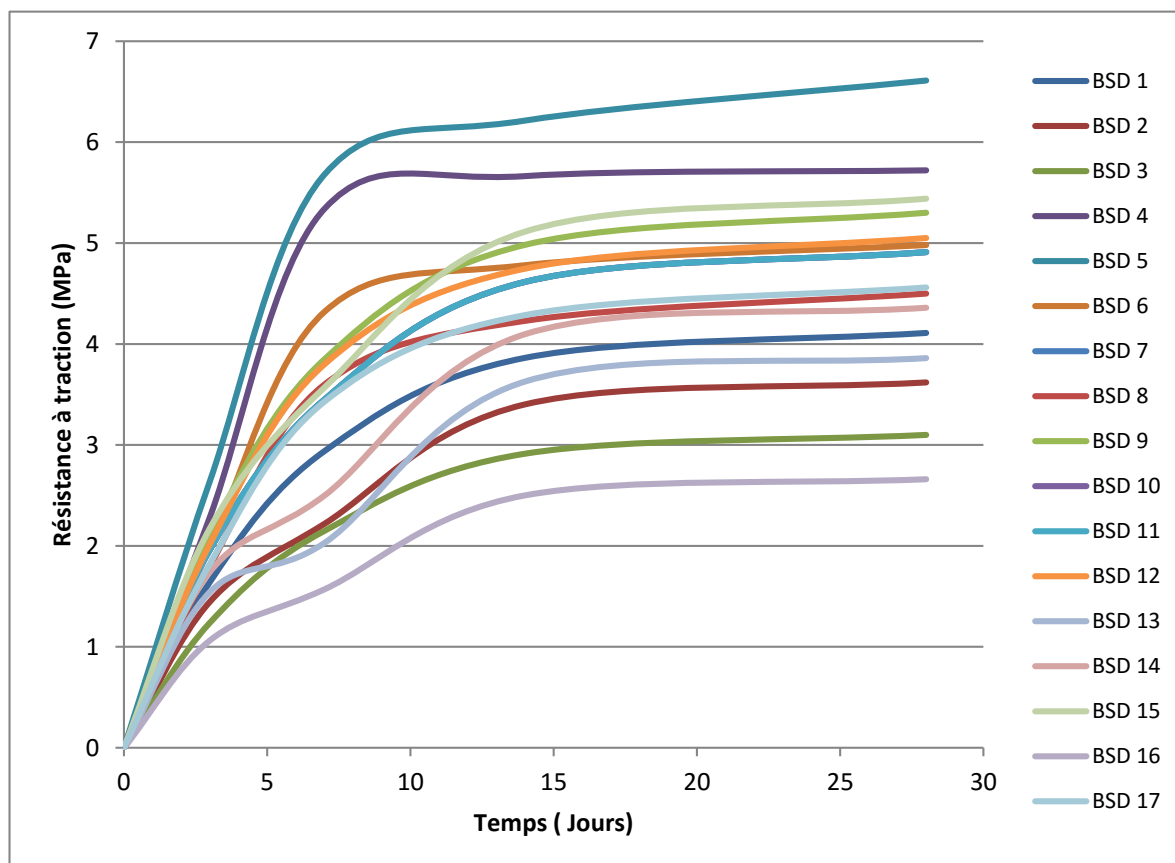
B/ EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION

Fig.IV.6 : Développement de la résistance à la traction dans le temps.

COMMENTAIRE

La résistance à la traction augmente dans le temps, il est bien claire que c'est la composition BSD5 qui montre la valeur la plus élevée, avec une résistance de 6.61 MPa à 28 jours. La plus faible est celle de la composition BSD16 avec une résistance de 2.66 MPa à 28 jours d'âge de béton.

IV.2.1.3 RETRAIT LIBRE :RL

A/ COURBES ISO-REPONSES

$$R_{et7} (\mu\text{m/m}) = 310.72 + 35.73 \cdot FC + 37.63 \cdot SA/SD - 21.81 \cdot LHF/C + 15.37 \cdot FC \cdot LHF/C$$

$$R_{et28} (\mu\text{m/m}) = 821.01 + 62.04 \cdot FC + 98.38 \cdot SA/SD - 44.79 \cdot LHF/C$$

Les modèles mathématiques développés, nous permettent de tracer les courbes iso-réponses du retrait libre à 07 et 28 jours d'âge du béton de sable de dune.

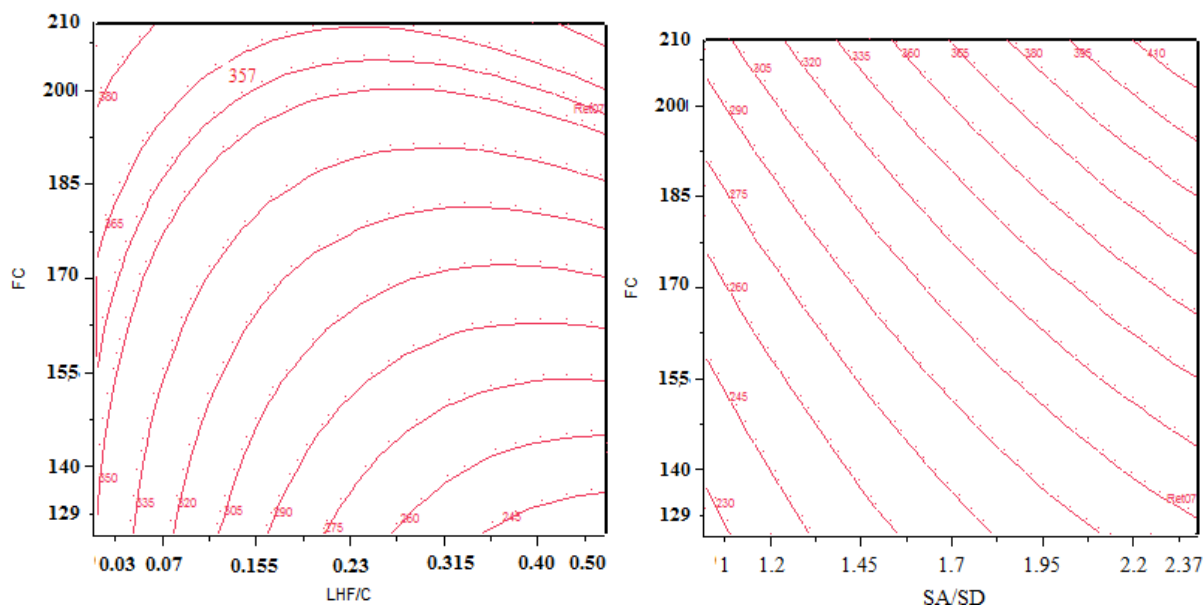


Fig. IV.7 : Courbes iso-réponses de retrait libre à 07 jours d'âge de béton

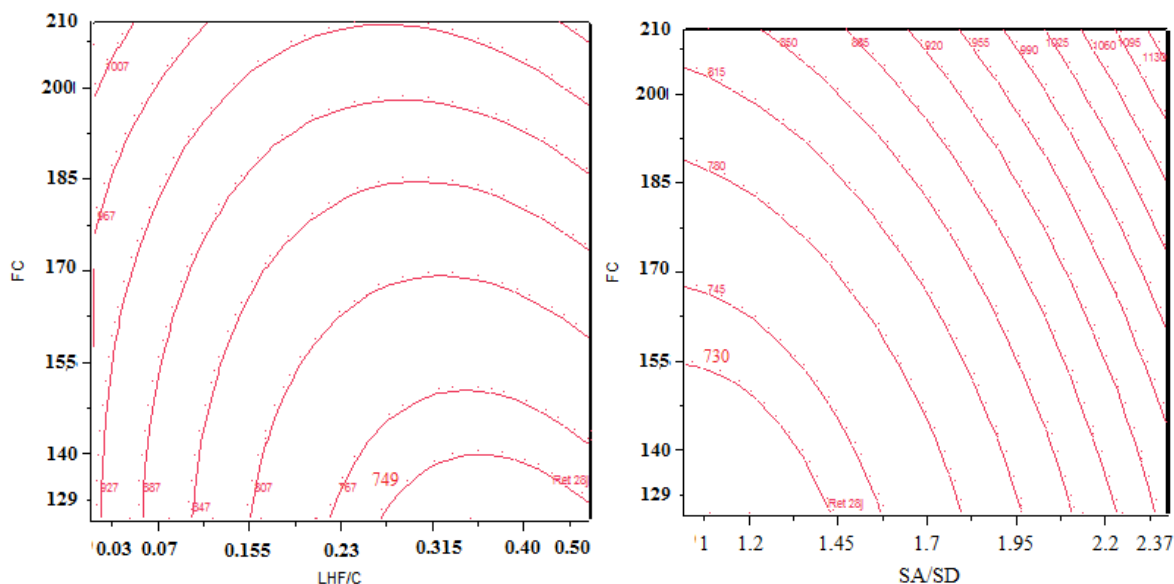


Fig. IV.8 : Courbes iso-réponses de retrait libre à 28 jours d'âge de béton

COMMENTAIRE

Le phénomène de retrait a été beaucoup étudié, parce qu'il est en liaison avec la tendance à la fissuration des liants durcis qui représente le premier signe de leur dégradation.

Le retrait libre est principalement dû au mécanisme de variation de la dépression capillaire et de la tension superficielle [Slowik et coll., 2008].

Pour ce qui est de retrait des bétons de sable d'après SABLECRETE, les recherches ont permis de constater que, lorsqu'on isolait le matériau de l'extérieur (milieu étanche), le retrait ,dit d'auto dessiccation, du béton de sable était voisin de celui du béton ordinaire (traditionnel). Si on laisse le béton sécher (milieu non étanche) le retrait du béton de sable peut atteindre des valeurs doubles de celui d'un béton classique.

Le rang du retrait libre mesuré dans notre étude de recherche sur le béton de sable avec ajouts minéraux à 28 jours est compris entre 727 et 1092 ($\mu\text{m/m}$) ; des valeurs très prometteuses pour un béton de sable de dune dont les valeurs usuelles sont de l'ordre de 1200 à 1300 $\mu\text{m/m}$.

Cependant le retrait à calculer (d'après l'allure des courbes de la figure IV.9) est loin d'être stable dans le temps.

Dans notre étude on peut constater qu'une augmentation du dosage en les fillers calcaires fait augmenter le retrait, cependant l'accroissement du rapport SA/SD favorise un retrait moindre.

B/ EVOLUTION DU RETRAITDANS LE TEMPS

DISCUSSION

Les courbes représentants l'évolution de retrait libre pour chaque formulation prennent une allure ascendante, indiquant que le retrait contenue encore dans le temps.

La combinaison qui a donné le retrait le plus faible est celle du BSD3 avec un rapport SA/SD assez élevé de 2.2 et des dosages faibles en filler calcaire [140 kg/m^3] et en laitier LHF/C =0.07.

La combinaison BSD 9 a donné le retrait le plus important (1092 $\mu\text{m/m}$) ; ce mélange contient plus de fines : [FC]= 200 kg/m^3 et un rapport LHF/C = 0.4.

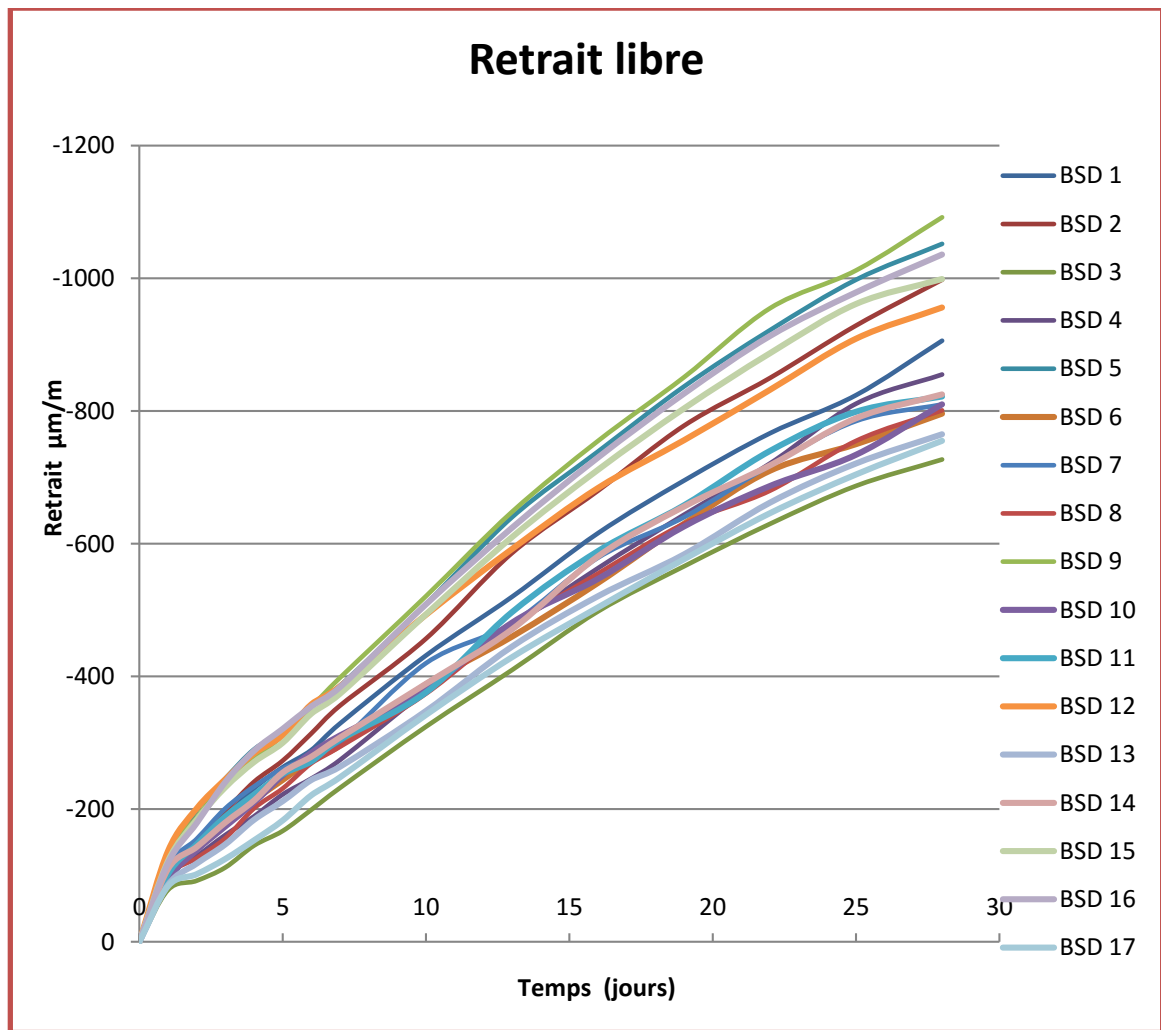


Fig. IV.9: Evolution du retrait dans le temps

IV.2.1.4 AFFAISSEMENT :Aff

COURBES ISO-REponses

$$A_{ff}(\text{cm}) = 5.61 - 1.78 \cdot SA/SD + 2.12 \cdot SA/SD^2 - 2 \cdot FC \cdot LHF/C + 1.75 \cdot SA/SD \cdot LHF/C$$

L'affaissement est mesuré pour chaque gâchée au cône d'Abrams. Les affaissements obtenus, varient de 5 à 15 cm dénotant ainsi des bétons assez plastiques à fluides, respectant ainsi l'ouvrabilité ciblée.

Les modèles développés, nous permettent de tracer les courbes iso-réponses de l'affaissement de béton de sable de dune.

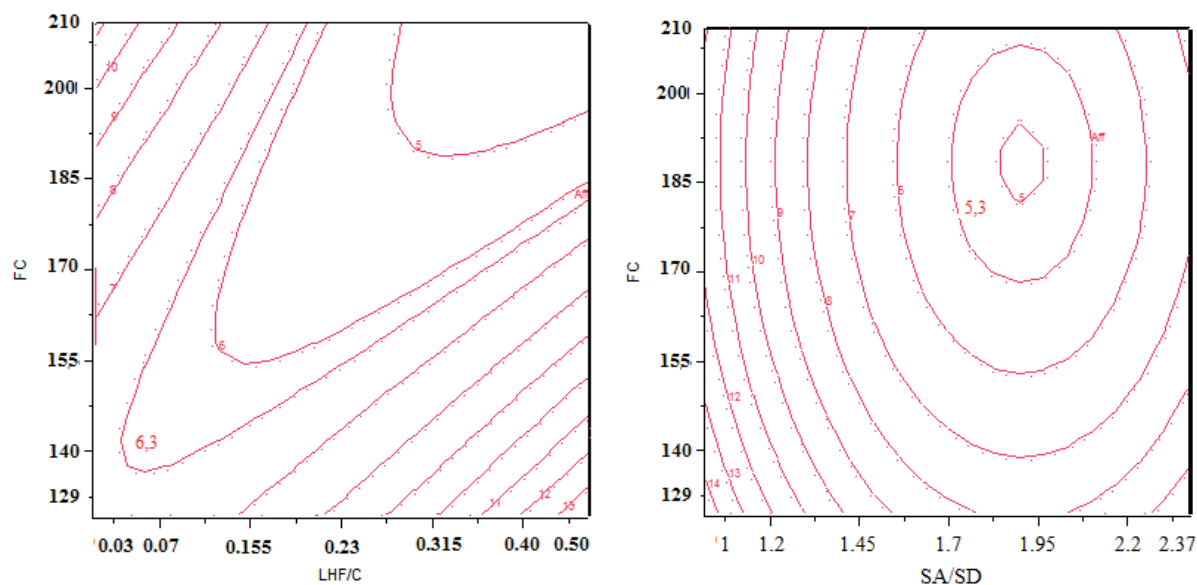


Fig. IV.10 : Courbes iso-réponses de l'affaissement des différents bétons

DISCUSSION

Les courbes iso-réponses, représentées dans la figure IV.10, montrent l'effet de la variation des paramètres [FC], [LHF/C] et [SA/SD] sur la réponse (A_{ff}), la figure qui permet de visualiser les effets du rapport [LHF/C] ou du rapport [SA/SD], et de choisir le dosage en fillers calcaires, requis pour une proportion d'addition donnée.

Les facteurs [SA/SD] et [LHF/C] ont des effets négatifs sur l'affaissement, d'ailleurs au cours de cette recherche nous avons obtenus des affaissements très faibles ainsi que des mélanges non maniables que nous avons remédié avec l'utilisation d'un super plastifiant à des dosages jusqu'à saturation.

D'autre part, l'augmentation du rapport [SA/SD] a un effet quadratique sur la réponse (A_{ff}) dans le domaine d'étude. Cette constatation est en accord avec la littérature [Melais et coll., 2011]. L'augmentation de la valeur du rapport LHF/C a pour effet d'apporter un surplus d'eau libre au mélange, d'où une augmentation de la plasticité du béton. Les interactions FC*LHF/C sont susceptibles d'apporter une correction négative au modèle, probablement à cause du passage d'une composition à une autre composition plus fine ou à l'inverse.

IV.2.1.5 MASSE VOLUMIQUE :MV

COURBES ISO-REPONSES

$$Mv(t/m^3) = 2.27 - 0.029 \cdot FC^2 - 0.016 \cdot FC \cdot SA/SD - 0.018 \cdot SA/SD \cdot LHF/C$$

La masse volumique du béton frais est mesurée après chaque gâchée. Dans l'ensemble, les masses volumiques des bétons BSDM varient de 2.19 à 2.28t/m³. La variation de la masse volumique des bétons peut être expliquée, en grande partie, par la fluctuation de la teneur en air dans les bétons. Les modèles développés, nous permettent de tracer les courbes iso-réponses de la masse volumique de béton de sable de dune.

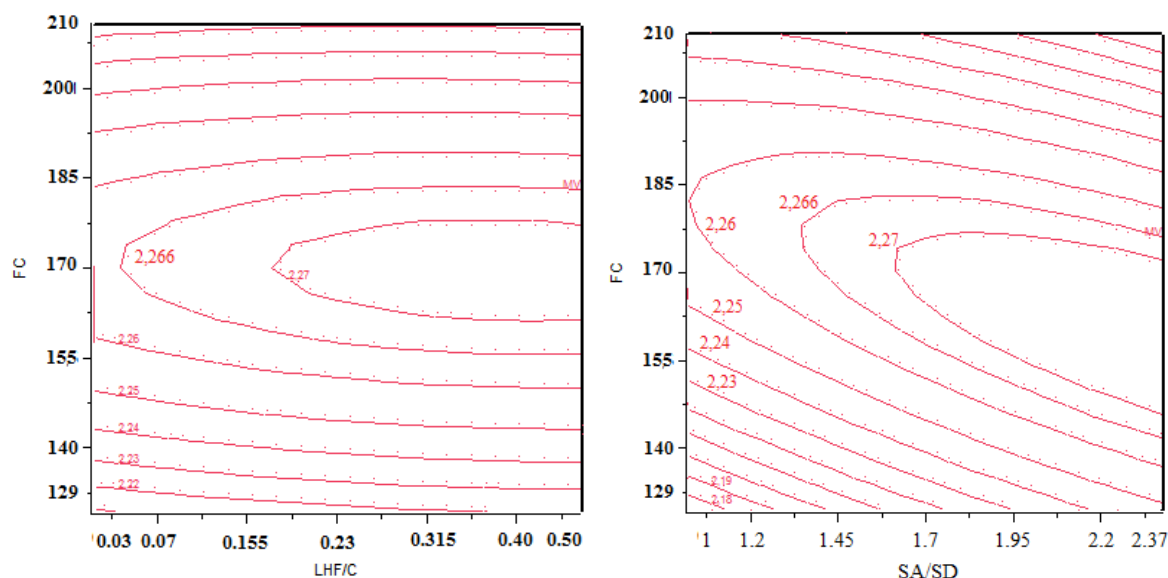


Fig.IV.11 : Courbes iso-réponses de la masse volumique des différents bétons

DISCUSSION

Les courbes iso-réponses, représentées dans la figure VI.5, montrent l'effet de la variation des paramètres [LHF/C], [SA/SD] et [FC] sur la réponse (Mv), les facteurs [LHF/C], [SA/SD] et [FC] sont précédés d'un signe négatif, donc une augmentation de leurs valeurs entraînant une diminution de la valeur de la masse volumique du béton à l'état frais et inversement. L'ajout de filler calcaire fait augmenter les densités, néanmoins cette augmentation de compacité est atténuée par l'interaction négative du facteur [FC] avec le facteur du rapport [LHF/C].

IV.2.1.6 AIR OCCLUS :A%

COURBES ISO-REPONSES

$$A(\%)=9.91 +1*FC*LHF/C-0.5*SA/SD*LHF/C$$

La mise en place du béton conduit ce dernier à renfermer toujours une certaine quantité d'air, appelé air occlus, ce volume dépend de l'énergie de serrage : plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus.

Lors du gâchage des différents bétons étudiés, on effectue une mesure de la quantité d'air piégé dans le matériau.

Les modèles développés, nous permettent de tracer les courbes iso-réponses de pourcentage d'air occlus dans les différents bétons de sable de dune.

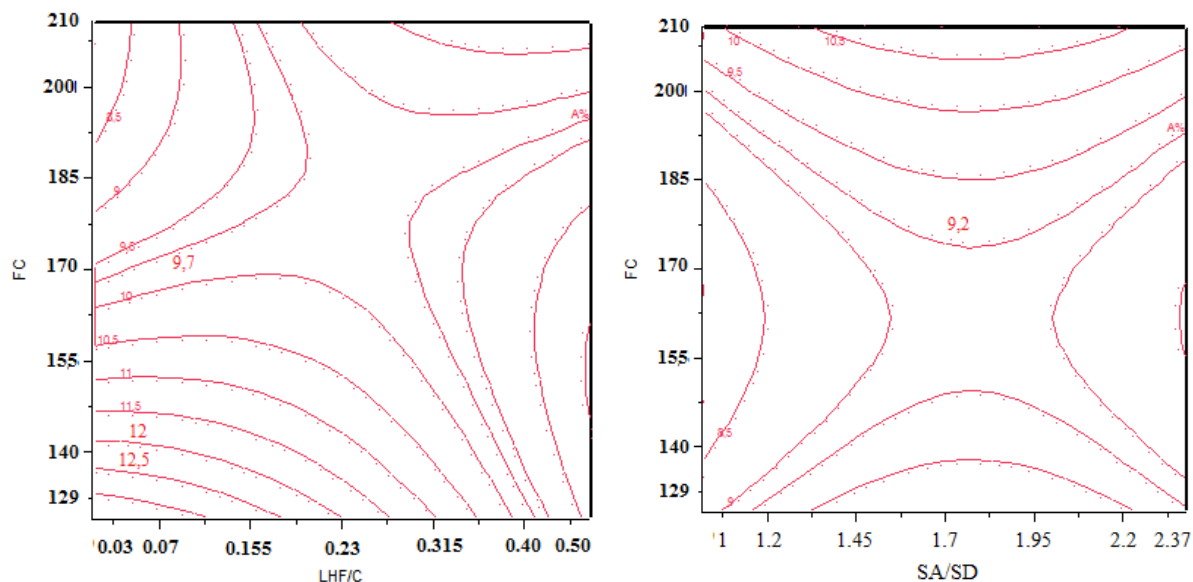


Fig.IV.12 : Courbes iso-réponses de l'air occlus des différents bétons

DISCUSSION

Le modèle développé, nous permet de tracer les courbes iso-réponses de la variation de l'air occlus. Les courbes iso-réponses, représentées dans la figure IV.12, montrent l'effet de la variation des paramètres [LHF/C] et [FC] sur la réponse (A%), la figure qui permet de visualiser les effets du facteur LHF/C, et de choisir le dosage en fillers calcaire, requise pour une proportion d'addition donnée. L'air occlus est affecté par la variation surtout de (du rapport) [LHF/C] et du dosage en filler calcaire [FC] de la façon suivante ; si on varie le dosage de filler [FC] dans un intervalle de (129 à 170 kg/m³) on remarque que le pourcentage d'air occlus diminue en augmentant la teneur de LHF/C, cependant cet effet s'inverse si la concentration des fillers calcaires est dans l'intervalle (170 à 210 kg/m³). L'ajout du filler calcaire dans le béton fait augmenter la compacité et par conséquent la teneur en air occlus est diminuée. Cette augmentation de FC entraîne la diminution de la surface spécifique du mélange, donc son imbibition nécessite moins d'eau, ce qui entraîne plus de plasticité. La quantité d'air occlus mesurée dans le cas de ces bétons varie entre 7 et 13%. Si l'on admet que 1% d'air, occupant le même volume que dix litres d'eau, réduit partiellement la résistance à la compression, on conclut en l'occurrence que l'air occlus dans un béton doit toujours être mesuré et pris en compte [Baron & Ollivier, 1996].

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'idée de promouvoir la technologie et l'utilisation du béton de sable de dunes est née de plusieurs constatations :

- Abondance de la matière première : le sable dunaire est un matériau très abondant, on le trouve dans de nombreux pays en quantité quasi-inépuisable. En Algérie par exemple, il couvre environ 60% du territoire.
- Tendance pour les granulats alluvionnaires et de carrière à la raréfaction et donc au surcoût : Si on sait que les granulats entrent dans la composition du béton classique dans une proportion de 75%, on réalise nettement l'augmentation du prix de revient du béton.
- Coût du transport des granulats : dans certains endroits pauvres en granulats ou ayant des ressources mal réparties, il faut parfois les transporter sur des distances très grandes ce qui va induire un surcoût dû au transport et un retard dans les délais de réalisation. L'utilisation des sables dunaires disponibles localement parait une solution au problème.

Le béton de sable apparaît donc comme un matériau opportun de substitution pour peu que sa formulation donne les caractéristiques rhéologiques et mécaniques équivalentes à celles des bétons classiques pour les usages envisagés.

-L'utilisation du laitier de haut fourneau, comme ajout cimentaire dans une formulation de béton de sable de dune, contribue à améliorer ses performances mécaniques, tout en préservant l'environnement. Lorsqu'il est mélangé au ciment, le laitier réagit avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) issu de l'hydratation du ciment pour former du gel de silicate de calcium hydraté (CSH) additionnel. Ce processus conduit à une amélioration de la résistance chimique et à un raffinement de la microstructure, Les propriétés de transport, notamment, la perméabilité à l'eau, au gaz ou aux ions de chlore, sont très sensibles à la microstructure de la matrice cimentaire du béton d'où une meilleure durabilité des bétons au laitier. Néanmoins cette amélioration, dépend fortement de l'hydratation du laitier et, par conséquent, de son activité hydraulique. Pour des laitiers caractérisé par une moyenne, voire une faible réactivité hydraulique, tel est notre cas il est utile de les utiliser comme des ajouts au ciment à des faibles taux de substitution [Bougara. A, 2009].

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de filler calcaire et de laitier en quantité optimale présente des avantages essentiels : une bonne résistance mécanique et une meilleure économie.
- Les résistances mécaniques à la compression, et la traction par flexion des bétons confectionnés avec les ajouts (filler calcaire et laitier) évoluent régulièrement avec le temps et ne présentent aucune chute de résistance.
- Une amélioration notable pour les résistances mécaniques est remarquée en augmentant la compacité de béton en ajoutant les fines calcaires.
- Le laitier contribue généreusement dans l'amélioration des performances mécaniques à condition qu'il soit utilisé comme substitution à des proportions modérées.
- L'utilisation de la théorie des plans d'expérience a permis d'optimiser de manière rationnelle les paramètres liés à la formulation des bétons de sable de dune.
- Cette recherche nous a permis aussi de proposer des modèles mathématiques expliquant au mieux les réponses d'essais des caractéristiques des bétons de sable étudiés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Achoura,D. ; « Contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitiers de hauts fourneaux d'El-Hadjar », thèse doctorat, département de génie civil, Université Badji-Mokhtar de Annaba, Algérie, (2005) 175

AFNOR, NF P 18-433, «Liants hydrauliques – Technique des essais – Détermination du retrait et du gonflement», février 1994.

Aguida B.Ilham « sand concrete, optimal composition and the humidity and the temperature effect on the compressive strength » Mémoire de Magister université de Bechar 2007.

Balayssac JP., Detriche CH., Grandet J. (1993), « intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage » .

Bantata .A, «Etude expérimentale d'un béton avec sable de dune de la région de ouargla (Ain Elbaida) » Mémoire de Magister, Université de Ouragla , Année 2003 / 2004.

Baron J. et Ollivier J.P., «Les Bétons – Bases et données pour leur formulation » , éditions Eyrolles, 1996.

Batata A., 1994 « le béton de sable de dune - sa formulation et ces propriétés » -CNERIB-P (345-353).

Bederina M., Khenfer M. M., Dheilly R. M. and Quéneudec M. «Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes », Cement and Concrete Research, Vol.35 (2005): 1172-1179.

Benaissa, A. ; Morlier, P. ; Viguiet, C. ; Cauvin, J.J., (juin 1992) : «Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable » ; Annales de L'ITBTP. N°504.

Boudaoud, Z; «Etude des effets du cobroyage d'un sable et d'un clinker sur les propriétés d'un béton de sable », Materials and Structures, Matériaux et constructions,35(2002) 310-316.

Bougara, A., Lynsdale, C., AND Ezziane, K., 2009. «Activation of Algerian slag in mortars». Construction &Building Materials, 23(1), 542–547.

Bouhnik B, « Contribution à la valorisation du sable de dune dans la formulation du sable destiné aux ouvrages hydrauliques en milieux sahariens », Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla),2007.

Box G.E.P, Hunter W.G et Hunter. J.S. « statics for experimentation: an introduction to design, data analysis and model building » Wiley Inyerscience, New York, 1978.

Breyse D., Alain D., Attar A., Chauvin J.J., « Contribution des granulats au comportement mécanique des bétons de sable chargés » , Revue française de génie civil. Vol.1, pp 89-114, 1997.

Chanvillard G. Giraudon G. ET Roque O., « Panneaux préfabriqués de façades en béton de sable renforcé de fibre de fonte amorphe », Fibre-Reinforced Concretes (FRC), 5ème Symposium International -RILEM, Lyon, sept. 2000.

Chanvillard G., et Basuyaux O., (sep-oct.1996), «Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées », Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées, N° 205, réf 4047, France.

Chaouch A. A. « Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes », Thèse de Magister, Ecole National Polytechnique (ENP), juillet 1993.

Chauvin J.J. (1987), « Les sables, guide pratique d'utilisation routière », I.S.T.E.D, Paris, France, P.74

CIM Béton, (1995), «Les béton de sable en structure de chaussées, centre d'information sur le ciment et ses applications », Paris, France.

Cisse I.K., (1996), « Contribution à la valorisation des matériaux locaux au Sénégal : Application aux bétons de sables », 1996.

Domec M. (1980), « Construction des chaussées au Sahara », Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger, Sep. 1980

Dreux G, Festa J, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 4^{ème} édition,
Dupain. R, Lanchon. R, J. C. Saint Arroman « granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Edition casteilla – 25, ruerouge-75005 Paris 1995

Feret.R, (1982) « la compacité des mortiers hydrauliques », Annales des ponts et chaussées, série 7, Volume 4, pp 5.164

Goupy J. and Creighton L. « Introduction to design of experiments with JMP examples, Third edition », Cary , NC :SAS Institute Inc,pp473, 2007

Guenoun R., « Etude et formulation d'un béton de sable de dune », P.F.E , ENP, Alger 2003.

Guinez R., Gluais G. et Delude P., (1984), «Les bétons de sable ministre de l'urbanisation et du logement, laboratoires régionaux de Blois et de Bordeaux», France.

Hadjoudja M. « influence de l'incorporation des fibres métalliques sur les propriétés physico-mécaniques et mécanisme de fissuration d'un béton de sable de dune », thèse de Doctorat ; université USTHB Alger 2014.

Hadjoudja M. « contribution à l'étude physico-mecanique du béton de sable de dune », mémoire de Magister. Université Amar Telidji Laghouat 2001.

Kettab R. «Valorisation du sable de dunes », thèse de doctorat, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 2007

Khady N, (1993), « Optimisation des formulations des bétons de sable», Projet de fin d'études, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, Juillet 1993.

L.R.P.C. de Bordeaux, «Etude des fillers, Rapport de recherche du 2 octobre 1992», 14 pages.

Le Cointe J.RC , 1997 « Importance du pourcentage d'air retenu sous forme de microbulles dans la résistance au gel des bétons pour barrage hydraulique sans frontière », N°19

Lea .S (2004) « Chemistry of Cement and concrete ». fourth Edition by Peter C. Hewlett, 241–289.

Louvet. F et L.Delplanque, «Design of Experiments : the french touch, Témoignage de l'association Expérimentique (partie III) » , n°ISBN :2-952512-60-4, 2005

Lvoviche M. (1991), « Utilisation des bétons de sable à Moscou, Recueil des communications du séminaire Franco-soviétique sur les bétons de sable », Bordeaux le 6 et 7 novembre 1991, pp226.49-51.

Montgomery, D.C. (2005) « Chapter 3 of Design and Analysis of Experiments », John Wiley & Sons, New York.

Norme française, « Analyse granulométrique par tamisage », NF P 18-560, Septembre 1990).

SABLOCRETE, (1994), « Bétons de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

Sado G. et SADO M.C. (1991), « Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité », Afnor Technique Ed., Paris.

Slowik V ; SCHMIDT M ; FRITZSCH R. « Capillary pressure in fresh cement –based materials and identification of air entry value ». cement and concrete composites 2008.

Sonebi. M ; L.Svermova et P.J.M. Bartos « statistical modelling of cement slurries for self-compacting SIFCON containing silica fume » , vol.38 (2005) pp79-86.

Unikowski Z.R. «Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment ». Thèse de doctorat d'ingénieur. LCPC. Paris. France. Avril 1981.

Yahia, A.; Khayat, K.H. «Statistical modelling of the coupled effect of mix design and rebar spacing on restricted flow characteristics of SCC ». Construction and Building Materials. Vol. 37, 2012. pp. 699–706.

Références bibliographiques

Yahia, A.; Tanimura, M.; Shimoyama, H. «Rheological Properties of Highly-flowablemortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio ». Cement Concrete Res. 35, 532-539, 2005.

Zeghichi L, « le ciment de laitier activé : liant promoteur » 2006

ANNEXES

SIKAPLAST® BV 40 +

Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2

Présentation

SIKAPLAST® BV 40 + est un plastifiant réducteur d'eau pour haute résistance mécanique non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.

Domaines d'application

SIKAPLAST® BV 40 + permet d'obtenir des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme.

- bétons à hautes performances,
- bétons précontraints,
- bétons préfabriqués étuvés.
- bétons avec des granulats concassés,
- bétons retarder en surdosage.

Pour les bétons étanches, le SIKAPLAST® BV 40 + diminue l'absorption capillaire des bétons et augmente leur compacité. Il permet donc de réduire la pénétration de l'eau et peut être utilisé dans les cas suivants: bétons enterrés, réservoirs, piscines, etc.

A dosage élevé, le SIKAPLAST® BV 40 + augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais.

Le SIKAPLAST® BV 40 + est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER5. Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier),
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage.

Caractères généraux

SIKAPLAST® BV 40+ est un plastifiant réducteur d'eau à haute performance qui confère au béton les propriétés suivantes :

- haute réduction d'eau,
- maintien prolongé de la rhéologie,
- robustesse vis-à-vis de la ségrégation,
- bel aspect de parement au décoffrage.

CLASSIFICATION 3R



RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU
4	2	3

Caractéristiques

Aspect

Liquide marron

Conditionnement

- Bidon de 5 kg
- Bidon de 10 kg
- Fût de 220 kg
- Cubiteinaire de 1000 kg

Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	Un an dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,040 ± 0,015
pH	4,7 ± 1
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 0,5 %
Extrait sec	11.5 ± 1,5 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1,5 % du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel du SIKAPLAST® BV40 + : 0,3 % à 1 %.
Mise en œuvre	SIKAPLAST® BV 40 + est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel.
 Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.
 «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair
 08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
 Alger/ ALGERIE
 Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
 213 (0) 21 50 16 92 à 95
 Fax: 213 (0) 21 50 22 08



MATINE

Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO²) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al²O³) et le fer (Fe²O³). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement,. etc.) ;
- Secteur industriel.



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tél: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CiBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tél: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE
لافارج