



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar THELIDJI - Laghouat

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

D-LMD

Spécialité : Génie civil

Option : Matériaux et analyse des structures

Thème

Effet du type de liant sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable - application de la méthodologie des plans d'expériences -

Présenté par :

SEYED Messsaouda

Mr. Ali ZAIDI	Professeur, U. de Laghouat	Président
Mr. Salim GUETTALA	Professeur, U. de Djelfa	Examineur
Mr. Rebbih ZAITRI	Maitre de Conférences, U. de Djelfa	Examineur
Mr. Mourad HADJOUJJA	Maitre de Conférences, U. de Laghouat	Examineur
Mr. Zoubir MAKHLOUFI	Professeur, U. de Laghouat	Directeur de thèse
Mr. Madani BEDERINA	Professeur, U. de Laghouat	Co-Directeur de thèse

Laghouat 2019 - 2020

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier les Professeurs Makhloufi Zoubir et Bederina Madani, de s'être engagés à assurer la direction de cette thèse. Aussi qui sont toujours montrés à l'écoute et très disponibles tout au long de la réalisation de cette thèse, pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils m'ont consacré pendant toute la période de mes recherches.

Je souhaite remercier l'ensemble des membres de jury qui ont eu la tâche d'examiner ce travail : Pr. Ali Zaidi d'avoir présidé le jury de thèse, Pr. Salim Guettala, Dr. Rebbih Zaitri et Dr. Mourad Hadjouja pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du laboratoire de matériaux et de réhabilitation de structure (SREML) et du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, enseignants, doctorants et staff techniques.

Les remerciements ne seraient être complets sans remercier Mme Souad Ben arrache, doctorante et elle était responsable du laboratoire de DRX à l'université de Laghouat, et le Pr. Yassine Djaballah chef de laboratoire d'étude physique et chimique des matériaux (LEPCM) Département de physique, Faculté des sciences des matériaux à l'université de Batna 1, je lui adresse tout mon respect pour sa gentillesse et son aide précieuse.

Mes vifs remerciements à mes parents, mes frères et mes sœurs, et je n'oublie pas d'adresser mes vifs remerciements aussi à ma deuxième famille (famille Belhadi) à Batna pour le sacrifice qui m'ont accordé tout au long de la préparation de cette thèse et pour m'avoir supporté et soutenu jusqu'à ce jour.

Finalement, la reconnaissance la plus sincère s'adresse à mon mari Belhadi Yamine, qui m'a épaulé moralement, m'a soutenu durant mes études et qui m'a toujours encouragé dans les moments de faiblesse, dans ma santé et de ma souffrance, merci, merci, et merci.

Merci à tous et à toutes

Résumé

Le béton de sable (BS) possède plusieurs propriétés spécifiques intéressantes, telles que la résistance, l'absence de ségrégation, le bel aspect de surface et la petite granularité, qui favorisent son utilisation dans certaines structures. Plusieurs travaux ont été réalisés dans l'objectif d'améliorer certaines propriétés du béton de sable à base de ciment et/ou de chaux, mais jusqu'à maintenant, aucune étude n'a été réalisée sur le béton de sable avec d'autres types de liant. Dans le présent travail, nous avons pensé à formuler un nouveau béton de sable en utilisant, séparément et en combinaisons, plusieurs types de liants. En effet, cette étude présente les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences a été utilisée afin d'optimiser la composition du BS, tout en veillant à atteindre les objectifs suivants :

- 1- Formulation de nouveaux bétons de sable avec différents types de liants tout en valorisant les matériaux locaux disponibles, notamment les sables (alluvionnaire et dunaire) et les fillers calcaires.
- 2- L'utilisation d'une nouvelle technique pour l'optimisation des mélanges à travers la substitution, partielle ou totale, du ciment par : la chaux, le plâtre, la pouzzolane et le polymère ; ces derniers composants ont été utilisés séparément et en combinaisons binaires et ternaires.

Les facteurs des plans d'expérience (ciment (C), chaux (Ch), plâtre (P), pouzzolane (Pz) et polymère (Pol)) sont les proportions des constituants du mélange et les résistances à la flexion (R_f) et les résistances à la compression (R_c) à 7, 28 et 90 jours sont les réponses. Des modèles mathématiques reliant l'effet des variations de ces paramètres sur les réponses étudiées sont établis.

La méthode des «plans de mélange» a permis d'obtenir, avec de bonnes précisions, les modèles et les courbes de prédiction de toutes les réponses étudiées. Le béton de sable à base de ciment N°9 (SC09) (contenant 100% C) présente les meilleures valeurs de résistance mécanique. L'addition de polymère dans le ciment et dans le plâtre comme un béton modifié par un polymère donne des résultats très intéressants par rapport à ceux du béton conventionnel. En effet, l'ajout de polymère améliore l'ouvrabilité et la résistance à la traction. L'étude microstructurale a montré que la qualité et la quantité des produits résultants dépendent des proportions de C, Ch, Pz, P, et de leurs hydratations, ce qui justifie les changements enregistrés dans les propriétés physicomécaniques des bétons étudiés. Quant à l'aspect général, le béton de sable étudié paraît relativement homogène et dense avec une bonne adhérence « matrice – granulats ».

Mots clés : Béton de sable, fillers calcaires, liants, polymère, propriétés physiques, mécaniques, microstructure, plans d'expériences.

Abstract

Sand concrete (SC) has several interesting specific properties, such as resistance, lack of segregation, beautiful surface appearance and small granularity, which are preferred to be used in some structures. Many research works have been done with the aim of improving certain properties of sand concrete, based on cement and /or lime, but so far no study has been done on sand concrete with other types of binder. In the current work, we are thinking about a new formulating for sand concrete, separately and in combinations, several types of binders. Indeed, this study presents the results of experimental program, in which the approach of experiments method has used to optimize the SC and consequently reach the following objectives:

- 1- The formation of new sand concrete using several types of different binders, and at the same time promoting and valuing the use of local materials such as sand (valley sand and dune sand) and limestone fillers.
- 2- The use of a new technique to find out the optimum mixtures of sand concrete through partial and total replacement of cement with: (lime, plaster, pozzolan and polymer), these last components were used separately and in combinations binaries and ternaries.

The factors in the design of the experiments method (cement (C), lime (Ch), plaster (P), pozzolan (Pz) and polymer (POL)) are the constituents proportions of the mixture. Although the flexural strengths (Rf) and the compressive strength (Rc) at 7, 28 and 90 days, are the responses .Therefore, mathematical models have been established taking into account the different effects of these factors on the studied responses.

The experimental design method "design of experiments" allowed to predict with accuracy models and curves all studied responses. The sand concrete of cement N°9 (SC09) (100% C) provides the best mechanical strength values. The addition of polymer in cement and plaster gives extremely effective results compared to conventional concrete. Polymer addition improves the workability and flexural strength. The microstructural study showed that the quality and quantity of the resulting polymer product depends on C, Ch, Pz, P and their hydration rate, which justifies the recorded changes in the tested properties of concrete. Finally, an optical microscopic analysis of the sand concrete studied showed that this material was relatively homogenous and dense with a good adhesion.

Keywords: Sand concrete, limestone fillers, binders, polymer, physical and mechanical properties, microstructure, experiment design.

الملخص

تتميز الخرسانة الرملية بالعديد من الخصائص المحددة والمثيرة للاهتمام، مثل المقاومة، وعدم الفصل، والمظهر السطحي الجميل والحبيبية الصغيرة، التي يفضل استخدامها في بعض الهياكل. تم القيام بالعديد من الأعمال والبحوث بهدف تحسين خصائص معينة من الخرسانة الرملية بالإسمنت أو الجير، ولكن حتى الآن لم يتم إجراء أي دراسات على الخرسانة الرملية مع غيرها من الروابط. في العمل الحالي. فكرنا في تكوين خرسانة رملية جديدة باستخدام عدة أنواع من الروابط بشكل منفصل أو في مجموعات. تعرض هذه الدراسة نتائج برنامج تجريبي تم فيه استخدام نهج تصميم التجارب من أجل تحسين تكوين BS، مع التأكد من الوصول إلى الأهداف التالية:

- 1- تكوين خرسانة رملية جديدة باستخدام عدة أنواع من الروابط المختلفة، وفي نفس الوقت تعزيز وتثمين استخدام المواد المحلية كالرمال (رمال الوديان ورمال كثبان الرملية) ، الحجر الجيري.
 - 2- استخدام تقنية جديدة لمعرفة المخاليط الأمثل للخرسانة الرملية من خلال استبدال جزئي وكلي للأسمنت بـ: (الجير والجبس والبوزلان والبوليمر)، حيث تستخدم هذه المكونات الأخيرة على حدى أوفي مجموعات ثنائية والثلاثية.
- عوامل التجربة في طريقة تصميم التجارب هي: (الاسمنت (C)، الجير (Ch)، الجبس (P)، بوزولان (Pz) والبوليمر (POL)) وهي تمثل نسب مكونات الخليط، وقوة مقاومة الضغط وقوة الانحناء في 7 و 28 و 90 يوما تعتبر كالردود، ولهذا تم إنشاء نماذج رياضية تربط تأثير اختلافات هذه العوامل على الاستجابات المدروسة .
- أن طريقة " تصميم التجارب " جعلت من الممكن الحصول بدقة جيدة على النماذج ومنحنيات والتنبؤ بجميع الاستجابات التي تمت دراستها. (C % 100 SC09) يقدم أفضل قيم القوة الميكانيكية. إضافة البوليمر في الاسمنت والجبس يعطي نتائج فعالة للغاية مقارنة مع الخرسانة التقليدية بدون إضافة البوليمر. إضافة البوليمر يحسن القابلية للعمل، وقوة الشد. أظهرت الدراسة المجهرية أن نوعية وكمية المنتجات الناتجة تعتمد على نسب C، Ch، Pz، PolP الامر الذي يبرر التغييرات المسجلة في خصائص الخرسانة المدروسة. وأخيراً، وفقاً للتحليل المجهرى البصري للخرسانة الرملية المدروسة، يبدو أن خرسانة الرمال المدروسة متجانسة نسبياً وكثيفة مع التصاق جيد "المصفوفة -الركام".

الكلمات المفتاحية: خرسانة رملية، الحجر الجيري، الروابط، بوليمر، خواص فيزيائية، ميكانيكية، البنية مجهرية، تصميم

التجارب.

Sommaire

Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des matières	
Introduction Générale	1
<i>Références</i>	5

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction	8
I.2 Historique.....	8
I.2.1 En Union Soviétique.....	9
I.2.2 En France.....	9
I.2.3 En Algérie.....	9
I.3 Propriétés essentielles du béton de sable	9
I.3.1 Ouvrabilité.....	9
I.3.2 Granulométrie	10
I.3.3 Résistance	10
I.3.4 Finesse et nature de l'addition	10
I.3.5 Dimension du Dmax (0/D).....	10
I.3.6 Propriétés spécifiques du béton de sable	11
I.3.6.1 Retrait.....	11
I.3.6.2 Fluage.....	11
I.3.7 Durabilité des bétons de sable.....	11
I.4 Avantages et inconvénients des bétons de sable	12
I.4.1 Avantages	12
I.4.2 Inconvénients.....	12

I.4.2.1	Résistance mécanique.....	12
I.4.2.2	Coût (non économique)	13
I.5	Utilisation des bétons de sable.....	13
I.6	Composition du béton de sable.....	13
I.6.1	Sables.....	13
I.6.2	Ciments.....	13
I.6.3	Eau (Eau de gâchage).....	14
I.6.4	Ajouts minéraux.....	14
I.6.4.1	Fillers	14
I.6.4.1.1	Effet des Fillers.....	14
I.6.4.2	Pouzzolane	15
I.6.4.2.1	Types de pouzzolane.....	15
I.6.4.2.1.1	Pouzzolane naturelle	15
I.6.4.2.1.2	Pouzzolane artificielle	15
I.6.5	Adjuvants.....	16
I.6.6	Plâtre.....	16
I.6.6.1	Différents types de plâtres	17
I.6.6.2	Propriétés essentielles du plâtre	17
I.6.6.2.1	Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie et Résistance au feu ...	17
I.6.6.3	Mortier de plâtre.....	18
I.6.6.4	Béton de plâtre	18
I.6.6.5	Domaine d'utilisation des éléments à base de plâtre.....	18
I.6.7	Chaux.....	19
I.6.7.1	Différents types de chaux et leurs classifications	20
I.6.7.2	Mortiers de chaux.....	21
I.6.7.3	Quelques travaux de recherche sur les mortiers de chaux.....	21
I.7	Formulation d'un béton de sable	23
I.8	Amélioration des propriétés des bétons de sable.....	24

I.8.1 Quelques travaux de recherche sur l'amélioration des propriétés des bétons de sable	24
I.9 Bétons résineux	35
I.9.1 Introduction	35
I.9.2 C'est quoi le polymère ?	35
I.9.3 Utilisation des polymères dans les bétons	35
I.9.4 Béton additionné de résine	37
I.9.5 Les latex	38
I.9.6 Modification avec poudre polymère redispersible.....	41
I.9.7 Modification de polymères hydrosolubles	41
I.9.8 Modification avec résines liquide	42
I.9.9 Modification de monomères	42
I.10 Conclusion	43
<i>Références</i>	44

Chapitre II : Caractéristiques des Matériaux et Techniques Expérimentales Utilisées

II.1 Introduction.....	55
II.2 Caractérisation des matériaux premiers.....	55
II.2.1 Sable.....	55
II.2.1.1 Analyse granulométrique	55
II.2.1.2 Analyse chimique par diffraction aux rayons X	56
II.2.1.3 Caractéristiques physiques	57
II.2.2 Ciment.....	57
II.2.3 Filler calcaire.....	58
II.2.3.1 Diffractométrie aux rayons X.....	59
II.2.4 Ajouts minéraux	59
II.2.4.1 Chaux hydraulique	59

II.2.4.2 Pouzzolane naturelle	60
II.2.4.3 Plâtre	61
II.2.5 Adjuvant	62
II.2.6 Eau de gâchage	62
II.2.7 Polymère (P)	62
II.3 Techniques expérimentales	63
II.3.1 Formulation des bétons de sable	63
II.3.2 Méthode des plans d'expériences	63
II.3.2.1 Notion d'espace expérimental	64
II.3.2.2 Surfaces de réponse	65
II.3.2.3 Notion de modélisation mathématique	66
II.3.2.4 Choix des expériences	66
II.3.2.4.1 Régression multilinéaire	67
II.3.2.5 Différents types des plans d'expériences	67
II.4 Plans de mélanges	67
II.4.1 Contrainte fondamentale des mélanges	68
II.4.2 Représentations géométriques des plans de mélanges	68
II.4.2.1 Représentation des mélanges à trois constituants	68
II.4.2.2 Représentation des mélanges à quatre constituants	69
II.4.3 Emplacement des points expérimentaux	69
II.4.3.1 Plans de mélanges en réseaux (Simplex-Lattice Designs)	69
II.4.3.2 Plans de mélanges centrés (Simplex-Centroid Designs)	70
II.4.3.3 Plans de mélanges centrés augmentés (Augmented Simplex-Centroid Designs)	70
II.4.4 Modèles mathématiques des mélanges	71
II.4.4.1 Logiciels et plans d'expériences	71
II.5 Caractérisation des bétons frais et durcis	71
II.5.1 Caractérisation du béton frais	71

II.5.1.1 Essai au maniabilimètre B 18.....	71
II.5.1.1.1 But de l'essai.....	72
II.5.1.1.2 Principe de l'essai.....	72
II.5.1.1.3 Equipement utilisé.....	72
II.5.2 Caractérisation du béton durci.....	73
II.5.2.1 Essai de rupture par flexion.....	74
II.5.2.2 Essai de compression.....	75
II.6 Etude micro-structurale.....	77
II.6.1 Analyse par diffraction des rayons X (RX).....	78
II.7 Conclusion	80
Références.....	82

Chapitre III : Résultat et Discussions

III.1 Introduction	85
--------------------------	----

Partie A

III.2 Etude physicomécanique	87
III.2.1 Etude d'un béton de sable à liant unique	87
III.2.1.1 100% Ciment.....	87
III.2.1.1.1 Etude de la maniabilité.....	87
III.2.1.1.2 Caractéristiques mécaniques	88
III.2.1.2 :100% Chaux	88
III.2.1.2.1 Maniabilité	89
III.2.1.2.2 Caractéristiques mécaniques	89
III.2.1.3 :100% Plâtre	91
III.2.2 Etude d'un béton de sable à liant substitué	92
III.2.2.1 Cas 1 :50% ciment.....	92
III.2.2.1.1 Méthode des plans d'expériences.....	93
III.2.2.1.1.1 Détermination des effets des facteurs.....	95
III.2.2.1.1.2 Création des modèles	95

III.2.2.1.1.3 Validité des modèles mathématiques	98
III.2.2.2 Cas :50% Chaux	101
III.2.2.2.1 Exploitation des résultats du plan de mélange	104
III.2.2.2.2 Modèles mathématiques	104
III.2.2.3 Cas 3 : 50% Plâtre	110
III.2.2.3.1 Exploitation des résultats du plan de mélange	110
III.2.2.4 Cas 4 : cas de polymère	119
III.2.2.4.1 Plans de mélanges proposés	119
III.2.2.4.1.1 Cas n°01 : cas de ciment	119
III.2.2.4.1.2 Cas n°02 : cas de plâtre.....	120
III.2.2.4.2 Exploitation des résultats.....	123
<u>Partie B</u>	
III.3 Etude micro structurale	132
III.3.1 Cas 1 : 50% Ciment.....	132
III.3.2 Cas 2 : 50% Chaux.....	136
III.3.3 Cas 3 : 50% Plâtre	142
III.3.4 Microstructure du béton au polymère.....	147
III.3.4.1 Mécanisme de l'hydratation.....	147
III.4 Conclusion.....	147
<i>Références</i>	149
Conclusions Générales	155

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 Différence entre béton de sable et béton ordinaire	8
Fig. I.2 Pouzzolane naturelle.....	15
Fig. I.3 Cycle de la chaux	20
Fig. I.4 Types des bétons de sable.....	25
Fig. I.5 Histogramme des résistances en compression et en traction par flexion du béton sable témoin et béton de sable chargé.	32
Fig. I.6 Modèle simplifié de la formation d'une co-matrice latex-ciment	40
Fig. I.7 Modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de L'hydratation du ciment d'un mortier modifié latex	41
Fig. II.1 Courbes granulométriques des sables utilisés.	56
Fig. II.2 Diffraction des rayons X du sable utilisé	56
Fig. II.3 Diffraction des rayons X du filler utilisé.....	59
Fig. II.4 Analyse par DRX de la chaux utilisée.	60
Fig. II.5 Analyse par DRX de la pouzzolane naturelle utilisée.....	60
Fig. II.6 Représentation de l'espace expérimental.	64
Fig. II.7 Représentation le point expérimental.....	65
Fig. II.8 Représentation de la surface de réponse.	65
Fig. II.9 Représentation du triangle équilatéral a trois factures.	68
Fig. II.10 Représentation des mélanges à quatre factures : Tétraèdre régulier.....	69
Fig. II.11 Représentation Plans de mélanges en réseaux.....	69
Fig. II.12 La représentation plane de mélanges centrés	70
Fig. II.13 Représentation plane de mélanges centrés augmentés.....	70

Fig. II.14 Principe de fonctionnement du maniabilimètre B .	72
Fig. II.15 Maniabilimètre B utilisé	73
Fig. II.16 Éprouvettes prismatiques 4x4x16.	74
Fig. II.17 Schémas de l'essai de flexion.	75
Fig. II.18 Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.	76
Fig. II.19 Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion.	76
Fig. II.20 Machine automatique de flexion du type « CONTROLS ».	77
Fig. II.21 Microscope optique utilisé	78
Fig II.22 logiciel le x'pert graphic.	79
Fig II.23 Diffractomètre des rayons X (X pert Philips).	79
Fig II.24 Diffractomètre des rayons X (X pert Philips).	80
Fig III.1 Dosage initial du ciment	87
Fig III.2 Evolution de la résistance à la compression et à la traction en fonction du temps	89
Fig III.3 Evolution de la résistance à la compression et à la traction en fonction du temps	91
Fig III.4 Procédure de substitution du ciment.	92
Fig III.5 Représentation triangulaire des 21 combinaisons étudiées à trois constituants	93
Fig III.6 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses : Rf 7j, 28j	98
Fig III.7 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses : RC7j et 28j	98
Fig III.8 Diagramme ternaire de Rf (MPa) en fonction des proportions C, Ch et P	99
Fig III.9 Diagramme ternaire de R c (MPa) en fonction des proportions C, (Ch) et P	99
Fig III.10 Résidus en fonction des valeurs prédites de la résistance mécanique	101
Fig III.11 Résidus en fonction des valeurs prédites de la résistance mécanique	101
Fig III.12 Procédure de substitution de la chaux.	102

Fig III.13 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à la flexion à 7 , 28jours et à 90 jours	109
Fig III.14 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses R_{tij}	109
Fig III.15 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses R_{cij}	110
Fig III.16 Procédure de substitution du Plâtre	110
Fig III.17 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à flexion à 7, 28jours et à 90 jours	112
Fig III.18 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses R_{fij} , R_{cij}	112
Fig III.19 Procédure de substitution du Ciment	119
Fig III.20 Procédure de substitution du plâtre	120
Fig III.21 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à la flexion à 7, 28jours et à 90 jours - Cas 1.....	124
Fig III.22 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses R_{cij} - Cas 1...124	
Fig III.23 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à la flexion à 7, 28jours et à 90 jours - Cas 1.....	126
Fig III.24 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses R_{fij} , R_{cij} Cas 1.....	126
Fig III.25 Analyse DRX de SC12 (100% P).....	133
Fig III.26 Analyse DRX de SC14 (80% P + 20% Ch)	133
Fig III.27 Analyse DRX de SC2 (20% P + 80% Ch)	134
Fig III.28 Aspect général des échantillons d'essai	136
Fig III.29 Analyse DRX de SC1 (50% Ch+50% Pz)	137
Fig III.30 Analyse DRX de SC2 (20% Ch+80% Pz)	138
Fig III.31 Analyse DRX de SC6 (100% Ch)	138

Fig III.32 Analyse DRX de SC17 (50% Ch+50% P)	139
Fig III.33 Analyse DRX de SC10 (20% P +60% Ch+20% PZ)	140
Fig III.34 Analyse DRX de SC08 (20% P +60% Ch+20% PZ)	140
Fig III.35 Aspect général des échantillons d'essai	141
Fig III.36 Analyse DRX de SC06 (20% P +60% Ch+20% PZ)	142
Fig III.37 Analyse DRX de SC020 (00%P + 80% Ch+20% PZ)	143
Fig III.38 Analyse DRX de SC020 (80% P + 00% Ch + 20% PZ).....	144
Fig III.39 Analyse DRX de SC012 (00% P +00% Ch+100% PZ).....	145
Fig III.40 Aspect général des échantillons d'essai	146

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Composition et rhéologie des bétons utilisés	34
Tableau. II.1 Propriétés physiques du sable mélange utilisé (SAD)	57
Tableau. II.2 Propriétés physiques et chimique (%) du ciment utilisé	57
Tableau. II. 3 Caractéristiques minéralogiques du ciment	58
Tableau. II.4 Propriétés physiques du filler utilisé.....	58
Tableau. II.5 Propriétés chimiques du filler utilisé (%)	58
Tableau. II.6 Propriétés chimiques du plâtre utilisé.....	61
Tableau. II.7 Propriétés physiques plâtre, chaux et pouzzolane.	61
Tableau. II.8 Principales propriétés du superplastifiant	62
Tableau. II. 9 Caractéristiques du polymère utilisé.....	63
Tableau. II.10 Composition du béton de sable utilisé	63
Tableau. II.11 Classe de consistance selon la durée d'écoulement	73
Tableau. III.1 Composition de base du béton de sable utilisé	87
Tableau. III.2 Maniabilité du béton de sable étudié (100% ciment)	88
Tableau. III.3 Résistance mécanique du béton de sable étudié (100% ciment).....	88
Tableau. III.4 Maniabilité du béton de sable étudié (100% chaux)	89
Tableau. III.5 Résistance mécanique du béton de sable étudié (100% Chaux)	89
Tableau. III.6 Résistance mécanique du béton de sable étudié (100% plâtre)	91
Tableau. III.7 Les 21 essais donnés par la méthode des plans d'expériences	94
Tableau. III.8 Contenu du ciment, de chaux et de pouzzolane dans le liant	94
Tableau. III.9 Résultats des tests de la caractérisation mécanique	95
Tableau. III.10 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées.....	96
Tableau. III.11 Proportions des facteurs dans les compositions étudiées	102
Tableau. III.12 Résultats des tests de la caractérisation mécanique.....	103
Tableau. III.13 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées	105

Tableau. III.14 Résultats des tests de la caractérisation mécanique.....	111
Tableau. III.15 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées	113
Tableau. III.16 Les 21 essais donnés par la méthode des plans d'expériences – <i>cas1</i>	120
Tableau. III.17 Les 21 essais donnés par la méthode des plans d'expériences – <i>cas2</i>	121
Tableau. III.18 Contenu des liants dans le béton étudié – <i>cas1</i>	121
Tableau. III.19 Contenu des liants dans le béton étudié – <i>cas2</i>	122
Tableau. III.20 Résultats des tests de la caractérisation mécanique dans le cas1 de ciment	122
Tableau. III.21 Résultats des tests de la caractérisation mécanique dans le cas2 de plâtre	123
Tableau. III.22 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles étudiées cas1	125
Tableau. III.23 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles étudiées cas2	127

Introduction générale

Jusqu'à présent, les principaux liants qui ont été utilisés dans la préparation des mortiers et des bétons sont le ciment et la chaux. Actuellement, le ciment occupe la première place en termes d'utilisation en tant que liant mieux adapté à la fabrication du béton des structures ; néanmoins, il reste toujours très coûteux. Quant à la chaux, un liant plus ancien que le ciment, a été utilisée dans la construction au cours de plusieurs siècles. Elle présente plusieurs caractéristiques intéressantes, telles que la bonne plasticité et la compatibilité avec le ciment. Par ailleurs, le mélange de ciment et de chaux a également été utilisé dans certains usages, tels que les blocs de terre stabilisée comprimés. La substitution du ciment a aussi fait l'objet de plusieurs recherches dans le but de réduire le coût et la pollution de l'environnement par le gaz « CO₂ » causée par la production du ciment. Dans ce contexte, Nagaraj et al.2014 [1] ont découvert dans leur travail expérimental que l'utilisation de chaux, en tant que remplacement de ciment dans des proportions déterminées, a été clairement efficace pour l'amélioration de résistance mécanique à long terme. Ils ont trouvé, qu'avec cette substitution, la durabilité et les performances des bâtiments se sont nettement améliorées par rapport à celles obtenues avec le ciment seul.

D'autre part, de nombreuses études ont été menées dans le but d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers et des bétons, en ajoutant ou en remplaçant les liants courants (ciment ou chaux) [2-12]).

Certains d'entre eux ont montré que les matériaux pouzzolaniques peuvent aussi remplacer partiellement le ciment Portland dans les mortiers et les bétons. Alors que d'autres auteurs ont étudié l'effet combiné du ciment (C), de la chaux (Ch) et de la pouzzolane (P) sur les propriétés des mortiers et des bétons [13]). Mais, ce qu'il convient de noter est que jusqu'à maintenant, aucune étude similaire n'a été réalisée pour le béton de sable, où, d'une part, la teneur en ciment est plus faible que celle des mortiers et plus proche de celle des bétons avec une présence essentielle de filler (généralement de nature calcaire), et d'autre part, les agrégats grossiers sont totalement absents [14,15].

Sur la base de plusieurs travaux antérieurs menés sur le béton de sable [16-20] et dans le but de poursuivre les recherches sur ce matériau, le présent travail a principalement porté sur la recherche de la possibilité de substituer, partiellement ou totalement, le ciment de ce nouveau béton par d'autres ajouts. Dans ce contexte, une partie du ciment (C) a été remplacée par diverses proportions de Chaux (ch), plâtre (P) et Pouzzolane (Pz), et polymère (Pol) afin d'apprécier l'effet de ces remplacements et d'optimiser leur effets combinés sur les propriétés mécaniques du béton de sable. Pour atteindre ces objectifs, on a utilisé la technique des plans de mélanges.

C'est une nouvelle technique qui optimise des mélanges sans être obligé de faire beaucoup d'expériences. Actuellement, les plans de mélanges sont largement utilisés dans des cas similaires [21-23], en raison de leurs faibles coûts d'exploitation ainsi que la facilité et la rapidité de l'exploitation de leurs résultats.

Objectifs de l'étude

La présente étude a deux principaux objectifs :

- 1- Formulation de nouveaux bétons de sables à base des matériaux locaux (chaux, plâtre ; sables) et des déchets industriels tels que les fillers calcaires ;
- 2- Utilisation d'une nouvelle technique pour l'optimisation des mélanges envisagés. En effet, le travail se concentre sur l'étude de l'effet de la teneur en ciment, chaux, plâtre, pouzzolane et polymère, ainsi que l'effet de leurs combinaisons sur les propriétés mécaniques du béton de sable. Quatre composants (liants) et un ajout minéral ont été utilisés séparément et en combinaisons binaires et ternaires. Pour l'optimisation des mélanges du liant, nous avons fait recours à la méthode des plans de mélanges, où les proportions des constituants du mélange (les additions) sont prises comme facteurs et les résistances à la flexion (R_f) et les résistances à la compression (R_c) sont considérées comme des réponses.

Plan de travail

Après une introduction générale, la thèse est organisée en trois grands chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les différentes propriétés du béton de sable (BS) à l'état frais et à l'état durci, ainsi que leurs domaines d'application. Enfin, une synthèse bibliographique sur les travaux récents menés sur le béton de sable a été présentée.
- Le deuxième chapitre discute les différentes caractéristiques des matériaux de base, ainsi que les méthodes et les procédures d'essais nécessaires pour la réalisation du programme expérimental envisagé. Une bonne partie est consacrée à la présentation du plan d'expériences utilisé, notamment pour le choix du type de plan d'expériences et à la description des procédures d'essais. Notons qu'aucune recherche détaillée n'a été faite pour l'étude de l'effet des combinaisons binaires et ternaires des liants (plâtre, pouzzolane naturelle, chaux et ciment) sur les propriétés des mortiers et des bétons de sable. Ce travail présente, en effet, une recherche expérimentale sur l'effet combiné des différents liants sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci du béton de sable.

- Le troisième chapitre a été divisé en deux grandes parties (partie A et partie B) :

Partie A :

Dans cette partie, on regroupe les essais et les résultats du comportement mécanique des bétons étudiés, à l'état frais et durci, suivi par des analyses et des interprétations de ces résultats ainsi que la discussion des résultats trouvés à l'issue des essais expérimentaux réalisés que les différentes compositions résultant de l'application d'un plan de mélange.

Partie B :

La partie B est consacrée à l'étude micro structurale des bétons utilisés. Elle s'est penchée sur l'identification des phases cristallines formées dans tous les bétons étudiés ; ceci a été suivi par analyse de diffraction des rayons X; afin de bien apprécier l'aspect microstructural des composites étudiés, une étude complémentaire, menée par microscope optique, a été réalisée :

Enfin, la thèse est clôturée par une conclusion générale évaluant l'application de la méthode des plans d'expériences dans le cas des bétons de sable et présentant une synthèse générale de l'ensemble des résultats ainsi obtenus ; ceci est, bien sûr, suivi de la présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

Références

- [01] Nagaraj H B, Sravan M V, Arun T G. « Role of lime with cement in long-term strength of compressed stabilized earth blocks». *Int. J. sustainable built environ*, Vol.3, PP54–61, 2014.
- [02] Neto C, Campiteli V. «The influence of limestone additions on the rheological properties and water retention value of Portland cement slurries in carbonate additions to cement ». In: Klieger Hooton, editor, *ASTM STP1064*. Philadelphia, american society for testing and materials, PP24–29, 1990.
- [03] Kronlof A. « Effect of very fine aggregates on concrete strength». *Master. Struct*, Vol.27, PP15–25, 1994.
- [04] Philippi P C, Rosendo Yunes P, Fernandes C P. «The microstructure of porous building materials: study of a cement and lime mortar». *Transp. porous. Media*. Vol.14, PP219–245, 1994.
- [05] Uchikawa H, Hanehara S, Hirao H. « Influence of microstructure o the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate». *Cem. Concr. Res*, Vol.26, PP101–111, 1996.
- [06] Larrard F. «Ultrafine particles for the making of very high strength concrete». *Cem. Concr. Compos*, Vol.21, PP172–189, 1999.
- [07] Pera J, Husson S, Guilhot B. «Influence of finely ground limestone on cement hydration». *Cem. Concr. Compos*, Vol.21, PP99–105, 1999.
- [08] Sebaibi Y, Dheilly R M, Beaudoin B. «The effect of various slaked limes on the microstructure of a lime cement–sand mortar». *Cem. Concr. Res*, Vol.36, PP971–978, 2006.
- [09] Mun K J, So S Y, Soh Y S. «The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete». *Constr. Build. Mater*, Vol.21, PP1576–1582, 2007.
- [10] Wei XuJingcheng Xu, Jia L. «The utilization of lime-dried sludge as resource for producing cement». *J. Cleaner Prod*, Vol.83, PP286–293, 2014.
- [11] Courard L, Degee H, Darimont A. «Effects of the presence of free lime nodules into concrete: experimentation and modelling». *Cem. Concr. Res*, Vol.64, PP73–88, 2014.
- [12] Lorca P, Calabuig R, Benlloch J. « Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition». *Mater. Des*, Vol. 64, PP535–541, 2014.
- [13] Gleize P J P, M€uller A, Roman H R. « Microstructural investigation of a silica fume–cement–lime mortar». *Cem. Concr. Compos*, Vol. 25, PP171–175, 2003.
- [14] National Press of School of Bridges and Roads. *Béton de sable*. « Caractéristiques et pratiques SABLOCRETE. Sand concrete – Characteristics and use practices». Ed. Presses of bridges. Paris, France. P236, 1994.
- [15] AFNOR, «Bétons – Béton de sable (concretes-sand concrete) ». *Project P 18–500*, P 13, 1995.

- [16] Bederina M, Khenfer M, Dheilily R M. «Reuse of local sand: effect of lime stone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concrete». *Cem. Concr. Res*, Vol.35, PP1172–1179, 2005.
- [17] Bederina, M, Marmoret, L, Mezreb, K. « Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of the sand concretes-experimental study and modeling». *Constr. Build. Mater*, Vol.21, PP662–668, 2007.
- [18] Bederina M, Laidoudi B, Gouilleux A. « Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes». *Constr. Build. Mater*, Vol. 23, PP 1311–1315, 2009.
- [19] Bederina M, Gotteicha M, Belhadj B. « Drying shrinkage studies of wood sand concrete –Effect of different wood treatments». *Constr. Build. Mater*, Vol. 36, PP 1066–1075, 2012.
- [20] Belhadj B, Bederina M, Montrelay N. « Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete». *Constr. Build. Mater*, Vol.66, PP 247–258, 2014.
- [21] Yahia A, Khayat K H. « Experiment design to evaluate interaction of high range water reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout». *Cem. Concr. Res*, Vol. 31, PP749–757, 2001.
- [22] Goupy J. « Plans d’expériences (design of experiments) ». *MODULAD Journal* N°34, PP37–79, 2006.
- [23] Goupy J, Creighton L. « Introduction to design of experiments with JMP examples ». 3rd ed. Cary, NC: SAS Institute nc; 2007.

I.1 Introduction

Un béton de sable est un béton constitué de sable, de ciment, d'eau, de fines d'ajout et d'un ou plusieurs adjuvants. Il est donc principalement constitué de sable [1-4] et il a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 publiée en octobre 1987 par l'association française de normalisation AFNOR [1]. Il se distingue des bétons ordinaires par l'absence des gros granulats, comme le montre la Figure. I.1, et des mortiers par son moindre dosage en ciment.

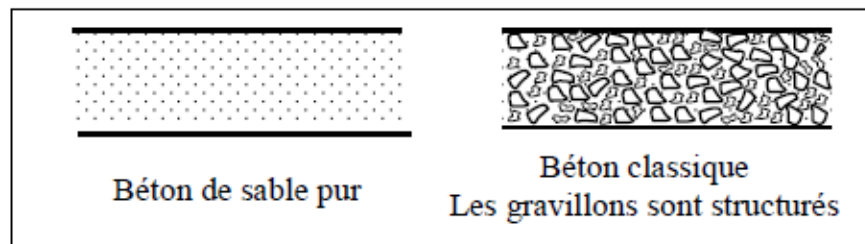


Fig. I.1 Différence entre béton de sable et béton ordinaire [5,6].

I.2 Historique

Le béton de sable est un matériau connu depuis fort longtemps, et a été utilisé dans plusieurs pays et dans des domaines différents. En effet, le béton de sable trouve ces origines dans “le béton aggloméré”, mis au point par le Français F. COIGNET dans le troisième quart du XIXe siècle. A l'époque, ce matériau se composait de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Plusieurs ouvrages ont été réalisés à partir de ce matériau et constituent les premières applications de cette technique [1,7-11] :

- la maison COIGNET à Saint Denis ;
- phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré en Egypte ;
- le pont de New York.

Le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau comme par exemple :

- Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP) et laboratoire régional des ponts et chaussées (LCPR) en France.
- des laboratoires en URSS.
- Ecole national polytechnique alger (ENPA) et le centre national d'étude et des recherches intégrées sur bâtiment (CNERIB) en Algérie.

I.2.1 En Union Soviétique

La Russie est parmi les premiers pays qui ont connu la technique des bétons de sable ; ceci peut être expliqué par le fait que ce pays est très pauvre en gros granulats et ses ressources sont mal réparties [10,12-16].

Le professeur académicien REHBINDER et son équipe ont réalisés en Russie les premières expérimentations en laboratoire sur des bétons de sable à base de broyage de sable avec le ciment et l'ajout d'un réducteur d'eau [17,19].

I.2.2 En France

La pénurie de gros granulats et la disponibilité de grands gisements de sable, notamment dans le sud-ouest Français, autorisèrent l'usage de ce matériau. A cet effet, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C) a mené, pour la première fois, des études sur cette technique [1,12,20] et par conséquent l'association « SABLOCRETE » a vu le jour en 1988 en France pour coordonner les travaux de recherche sur ce matériau.

I.2.3 En Algérie

Vu l'abondance de sable de dune dans le sud Algérien ainsi que d'autres types sables, plusieurs recherches ont été établies pour la composition de bétons à base de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage) [21-26]. Les premières études ont été lancées par le CNERIB, d'où une série de travaux de recherche ont été engagés pour la valorisation de ce matériau dans la masse de béton [27].

I.3 Propriétés essentielles du béton de sable

I.3.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle se définit par la facilité des mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage [28]. En général, un béton est d'autant plus maniable qu'il est mouillé, c'est-à-dire que sa consistance est plus fluide, ce qui nécessite une grande quantité d'eau de gâchage et que la proportion d'éléments fins (ciment ou sable) est plus élevée [29].

Le béton de sable nécessite davantage d'eau que les bétons classiques. Ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C (eau/ciment) supérieures à 0.5 ; ce rapport se situe généralement entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange [1,10,20,29].

Le béton de sable a donc une bonne capacité à remplir parfaitement des moules avec une énergie de mise en place moindre et un bon enrobage des armatures [1].

I.3.2 Granulométrie

La granulométrie du sable a également son effet sur le besoin en eau. Plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité : l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de maniabilité.

Pour chacun des sables, l'augmentation de la teneur en fine (diminution du module de finesse) entraîne une maniabilité moins bonne. Le phénomène n'a pas un caractère systématique, il dépend de la nature des fines incorporées. Logiquement l'ajout des fines de type sphérique, en diminuant la quantité des vides, devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

I.3.3 Résistance

Au dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres, qui sont en particulier :

- la finesse de l'addition ;
- la nature de l'addition ;
- la dimension du D_{\max} (0/D).

I.3.4 Finesse et nature de l'addition

Plus l'addition est fine, plus elle est efficace au niveau du gain en compacité (et donc du gain en résistance) ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable.

En ce qui concerne la nature des fines, différentes natures ont été essayées et comparées. Le résultat obtenu est que les fines calcaires sont les plus réactives avec le ciment et donnent les meilleures résistances [1,31-33].

I.3.5 Dimension du D_{\max} (0/D)

- Pour un rapport E/C fixe :

La résistance n'est pas trop influencée par le diamètre maximal des grains de sable (D_{\max}). La maniabilité s'améliore avec l'augmentation de D_{\max} [5].

- Pour des rapports E/C différents :

À maniabilité constante, la résistance diminue avec la diminution de D_{max} [5].

I.3.6 Propriétés spécifiques du béton de sable

En effet, des essais de retrait et de fluage ont été réalisés sur le béton de sable et comparés avec ceux d'un béton classique [21,32,34].

I.3.6.1 Retrait

La différence de retrait qui existe entre les deux matériaux (béton de sable et béton classique) est vraisemblablement liée à plusieurs paramètres, dont nous citons :

- l'influence du dosage en eau ;
- l'influence du dosage en ciment ;
- l'influence de la distribution et de la taille des vides, qui sont largement influencées par la taille des grains de sable et la quantité des fines [35].

On distingue deux niveaux de retraits selon la mode de conservation :

- *Si la conservation est en milieu sec* : le retrait du béton de sable peut atteindre des valeurs doubles de celui d'un béton classique (Retrait de séchage).
- *Si la conservation est en milieu étanche* : la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton traditionnel ; dans ce cas, le retrait est appelé retrait d'auto dessiccation [21,34,36].

I.3.6.2 Fluage

Le phénomène du fluage est une déformation qui résulte de l'effet d'une contrainte constante appliquée au béton. Donc pour éviter l'apparition de ce phénomène, il faut minimiser la quantité de ciment, c'est-à-dire remplir les pores par des matériaux inertes et solides [37,38].

- À un niveau de résistance en compression de 25 MPa, la valeur du fluage du béton de sable est plus importante que celle du béton classique.
- Dans le cas où la résistance est supérieure à 25 MPa, le fluage du béton de sable est divisé par 5 [1,34,36,39].

I.3.7 Durabilité des bétons de sable

La durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, à l'aide d'essais de perméabilité à l'eau et à l'air, de mesure de la carbonatation et de la pénétration des ions chlorures, on peut estimer la durabilité.

Les paramètres, tels que la porosité, organisation géométrique des pores et perméabilité, sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcali-réaction ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur.

Les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels ; ils contiennent davantage de vides. La taille et le nombre de ces vides se distinguent de ceux du béton traditionnel ; ils sont, en effet, plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Leur nombre plus élevé entraîne une probabilité de colmatage plus fréquente et plus aisée, compte tenu de leur faible taille [1, 5,7,39-41].

Mais pour des bétons bien et correctement formulés, c'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment, le comportement du béton de sable est très satisfaisant et même excellent [1].

I.4 Avantages et inconvénients des bétons de sable

Grace à leurs propriétés spécifiques, les bétons de sable présentent quelques avantages et quelques inconvénients, parmi lesquels, on peut citer :

I.4.1 Avantages

- l'absence de ségrégation ;
- qualité esthétique : meilleur aspect de surface ;
- excellente maniabilité ;
- poids plus faible ;
- bonne adaptation aux milieux fortement ferrailés ;
- intérêt économique par la réduction des coûts de transport des matériaux et coût de la main d'œuvre.

I.4.2 Inconvénients

I.4.2.1 Résistance mécanique

La résistance mécanique des bétons de sable est inférieure à celle du béton traditionnel et la cinétique de montée en résistance est plus lente ; ce qui peut limiter l'usage de ces bétons pour des ouvrages trop chargés.

I.4.2.2 Coût (non économique)

La grande teneur en grains fins qui donne une grande surface spécifique conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable. Ceci entraîne l'augmentation du dosage en ciment [42] et l'augmentation du dosage en ciment n'est pas sans incidence sur le coût.

Pour ces raisons, les constructeurs peuvent rechercher d'autres liants plus économiques par voie de substitution partielle ou totale du ciment.

I.5 Utilisation des bétons de sable

Les bétons de sable peuvent être utilisés dans tous les domaines du génie civil. On peut citer à titre d'exemple [42-48] :

- fondations ;
- bâtiment ;
- voirie et construction routière ;
- ouvrages d'art ;
- accessoires de VRD.

I.6 Composition du béton de sable

Le béton de sable est constitué par le sable, le ciment, le filler, l'eau et éventuellement un ou plusieurs adjuvants :

I.6.1 Sables

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 µm et 05 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% [49].

I.6.2 Ciments

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous la forme d'une poudre minérale très fine ; mélangée avec l'eau, il forme une pâte faisant prise et durcit progressivement, dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. La proportion de chaux et de silice réactives devant être au moins de 50% de la masse du ciment. Les principaux constituants du ciment portland sont :

- silicate tricalcique également dénommé « alite » C_3S $3CaO.SiO_2$
- silicate bi calcique ou « bélite » βC_2S $2CaO.SiO_2$
- aluminat tricalcique C_3A $3CaO.Al_2O_3$
- alumineux - ferrite tetracalcique..... $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

Le deuxième constituant du ciment portland est le gypse ; son rôle est de retarder la prise qui est très rapide. La teneur en gypse (représentée par la teneur en SO_3) est déterminée en fonction des teneurs en alcalis solubles (Na_2O , K_2O) en C_3A et de la surface spécifique Blaine du clinker [50-55].

I.6.3 Eau (Eau de gâchage)

C'est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec du mortier ou du béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du mélange. L'eau de gâchage doit être pure et propre. La quantité d'eau utilisée, ou plus précisément le rapport E/C, a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, sa résistance mécanique, sa microstructure, sa durabilité, la cinétique d'hydratation, etc. [56].

I.6.4 Ajouts minéraux

Ce sont des particules de très faibles dimensions qui sont incorporées dans le béton pour améliorer certaines caractéristiques physico-chimiques. Exemple : laitier, fumée de silice, cendres volantes, pouzzolanes et fillers calcaires. Dans notre cas, on a utilisé la pouzzolane et les fillers calcaires.

I.6.4.1 Fillers

Les fillers calcaires sont des matériaux très finement broyés, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, présentant une teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$ supérieure à 75%. Ils présentent une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland.

Ce sont des fines qui ont pour but de combler en partie les vides du sable et augmenter la compacité du béton. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production [56].

I.6.4.1.1 Effet des Fillers

Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes :

- l'accroissement de la maniabilité ;
- la diminution de la perméabilité et de la capillarité ;

- et l'amélioration de la résistance mécanique.

I.6.4.2 Pouzzolane

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes [57,58]. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance, ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment, améliorent la résistance à la fissuration, améliorent la cohésion interne, augmente la compacité de la pâte de ciment, etc. [59-63].

I.6.4.2.1 Types de pouzzolane

I.6.4.2.1.1 Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles (Fig. I.2) sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées (Elles peuvent être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire : terre à diatomées, diatomites.), puis broyées pour obtenir une fine poudre [64].



Fig. I.2 Pouzzolane naturelle.

I.6.4.2.1.2 Pouzzolane artificielle

L'effet pouzzolanique peut être obtenu, non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire, mais aussi à partir de matériaux artificiels [65-66]. La pouzzolane, en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle riche en silice et en alumine.

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets de différentes industries. On distingue, soit des résidus de fabrication industrielle, tels que le mach fers, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de briques et de tuiles fabriquées avec des argiles pures à des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuit et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [67].

I.6.5 Adjuvants

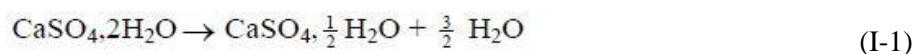
Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps, mais leur développement réel et la multiplication de leur utilisation n'ont commencé que depuis 1960 [68]. Ils sont définis comme des produits solubles dans l'eau destinés à être incorporés dans le béton dans le but de modifier certaines propriétés du béton avec des teneurs souvent supérieures à 5% de la masse du ciment [69-71]. Comme les autres types de bétons, les bétons de sable utilisent également les adjuvants ; dans la plupart des cas ; ce sont généralement des réducteurs d'eau utilisés pour réduire le dosage en eau et améliorer la maniabilité, et par conséquent augmenter les performances mécaniques.

I.6.6 Plâtre

La pierre de plâtre est un sulfate de calcium qui se trouve dans la nature sous deux formes :

- L'anhydrite, ou sulfate de calcium anhydre, assez rare, qui répond à la formule chimique CaSO_4 .
- Le gypse, ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau, di-hydraté, très abondant, qui répond à la formule chimique $(\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O})$.

Le mot plâtre désigne à la fois le matériau de structure solide (plâtre pris) et la poudre qui permet de l'obtenir ; cette poudre (sulfate de calcium hémi hydraté, $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$) s'obtient en déshydratant du gypse, selon la réaction : [72,73]



Selon les conditions de pression et de vapeur d'eau imposées, on distingue deux principes de cuisson :

✓ **La Cuisson par voie sèche** (la plus utilisée, car moins coûteuse), qui est réalisée à la pression atmosphérique ou sous une faible pression partielle de vapeur d'eau. Vers des températures de 140 à 170 °C ; l'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et donne un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux, c'est l'hémi hydrate β , il nécessite un taux de gâchage E/P (Eau/Plâtre) $<0,6$. Il s'agit du composé principal de plâtres courants utilisés en tant que matériau de construction. Par chauffage vers 400 à 600 °C on obtient de l'anhydrite II, (CaSO_4).

✓ **La Cuisson par voie humide** qui s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau dans des autoclaves sous 2 à 7 bars pendant quelques heures. Le produit obtenu est l'hémihydrate α , il nécessite un taux de gâchage faible E/P (Eau/Plâtre) = 0,4 et donne des plâtres dits "durs" ayant de très bonnes résistances mécaniques. Les plâtres courants qui se présentent sous forme d'une poudre blanche sont constitués de:

- hémihydrate β ($\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$) qui est le principal constituant des plâtres, la formule correspondant à 93,79% de sulfate de calcium CaSO_4 et 6,21% d'eau de cristallisation.
- mélange d'hémihydrate β avec de l'anhydrite II (CaSO_4) dont la proportion d'environ 2/3 d'hémihydrate et 1/3 d'anhydrite II. Il est à noter que, plus la proportion d'anhydrite II est importante, plus le durcissement est étalé dans le temps.
- d'hémihydrate α , compact, cristallin, faiblement soluble dans l'eau.

I.6.6.1 Différents types de plâtres

Il existe plusieurs variétés de plâtre de qualités très différentes ; leur classification se fait selon les facteurs suivants :

- granularité (plâtre gros ou fin) ;
- durée de prise (courte, allongée ou longue) ;
- dureté (normale ou très haute dureté THD) ;
- mode de mise en œuvre (manuelle ou par projection mécanique) ;
- domaine d'application (construction, emplois spéciaux, préfabrication, à mouler pour les arts et l'industrie) [74,75].

I.6.6.2 Propriétés essentielles du plâtre

I.6.6.2.1 Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie et Résistance au feu

Du fait de sa forte inertie thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique :

- Un enduit plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique.
- Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agrégats légers qui ont des conductivités thermiques de l'ordre de $0,18$ à $0,20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ sont particulièrement destinés à cet usage.

L'une des propriétés les plus caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu. Cette protection a pu autrefois être obtenue grâce à de larges garnissages de plâtre remplissant complètement les intervalles séparant les éléments de construction [76,77].

I.6.6.3 Mortier de plâtre

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé de plâtre, de sable et d'eau. Les études du C.N.E.R.I.B imposent les limites des caractéristiques que doit avoir le sable utilisé, aussi bien dans le mortier que dans le béton de plâtre.

I.6.6.4 Béton de plâtre

Pour obtenir un béton de plâtre, il faut tout d'abord disposer d'un bon mortier de plâtre, c'est-à-dire d'un mortier ayant un rapport E/P (Eau / Plâtre) réduit. Par ailleurs, la mise en œuvre du béton de plâtre par vibration permet d'améliorer les propriétés du béton en épaississant sa pâte [73].

Pour l'obtention d'une meilleure ouvrabilité et une résistance satisfaisante, Sonebi Recommande l'utilisation d'un rapport E/P= 0,6 [74]. En Algérie et vu l'absence d'une méthode universelle pour la formulation des bétons de plâtre, on respecte généralement les recommandations des travaux du C.N.E.R.I.B. [72]. La composition de base du béton de plâtre est comme suit :

- 1 sac de plâtre : 40 kg ;
- Gravier 5/15 : 60 à 80 kg ;
- Chaux éteinte : 1 à 1.5 kg ;
- Eau : 16 à 24 L ;
- S/P : = 0.5.

I.6.6.5 Domaine d'utilisation des éléments à base de plâtre

L'utilisation de plâtre est très variée dans le domaine de génie civil. On peut citer certaines applications modernes :

- Les blocs pleins ou creux pour murs porteurs ou de remplissages.

- Les hourdis ou voutains comme éléments de planchers.

Soltane présente le prototype réalisé à Biskra [73] avec les éléments suivants :

- blocs en béton de plâtre ;
- plancher premier niveau et terrasse constitués à base de poutrelles semi-préfabriquées en béton armé et une dalle légèrement armée sur les voutains en plâtre.

Sonebi présente le prototype réalisé à Rabat [74] avec les éléments suivants :

- mur en mortier de plâtre ;
- des dallâtes en plâtre armé pour plancher des voutes ;
- mur non porteur en carreaux de plâtre.

Zuber [75] dans sa recherche d'un procédé de construction destiné à la zone tropicale sèche donne les éléments en mortier de plâtre suivants :

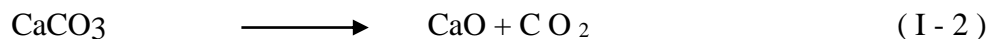
- un bloc creux (20x20x40) cm³ pour mur ;
- une dallâtes (60x52x8) cm³ pour les planchers ;
- une pièce en U de (20x20x40) cm³ utilisable soit en coffrage linteaux, soit en marche qui doit être couverte d'un revêtement anti-abrasion ;
- une poutrelle en plâtre armé de (12x14) cm².

Aldeberet pour la rénovation des salles d'exposition du grand Louvre [78], a choisi le plâtre sous multiples formes :

- cloisons destinées à devenir support de chinoises ;
- doublages thermiques et acoustiques en plâtre ;
- plafonds de staff.

I.6.7 Chaux

La chaux (CaO) est obtenue par cuisson de pierre calcaire à une température allant de 750 à 950°C, cuisson pendant laquelle elle abandonnera son gaz carbonique. Cuire le calcaire pour le transformer en chaux s'appelle calcination. Elle est exprimée par l'équation chimique suivante :



Les chaux existantes qui sont commercialisées sont de deux types : chaux vive et chaux éteinte. Dans sa forme naturelle, la chaux est vive (CaO) (oxyde de calcium). Celle-ci peut aussi être rencontrée sous une forme appelée dolomite de chaux (CaO+MgO). La chaux éteinte (hydroxyde de calcium Ca(OH)₂), est obtenue par hydratation de la chaux vive. Elle est exprimée chimiquement par les équations suivantes :

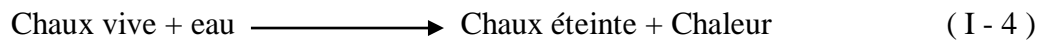
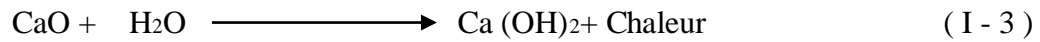


Fig. I.3 Cycle de la chaux [79].

Trois types de chaux sont industriellement productibles :

- la chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ;
- la chaux dolomitique hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$) ;
- la chaux dolomitique hydratée double ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$).

I.6.7.1 Différents types de chaux et leurs classifications

La présence de l'argile dans le calcaire provoque d'importantes modifications qui affectent la chaux, aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant le pourcentage de l'argile présente dans la roche pendant la calcination, on peut distinguer deux types de chaux [79,80] :

- **les chaux aériennes (CL : Calcic Lime) :**

La prise s'effectue seulement en présence du gaz carbonique de l'air (d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conservation de grandes quantités de chaux éteinte). Les chaux aériennes se distinguent elles-mêmes en :

- chaux grasse : qui est du calcaire pur, ou contient 0,1 à 1 % d'argile ;
- chaux maigre : qui contient 2 à 8 % d'argile.

- **Les chaux hydrauliques (NHL : Natural Hydraulic Lime) :**

Elles prennent sans l'aide du CO_2 de l'air. Un mortier fait avec de telles chaux peut durcir sous l'eau. Elles sont obtenues avec des calcaires contenant entre 8 et 20 % d'argile.

On note que les chaux hydrauliques naturelles sont calcinées comme les chaux aériennes aux mêmes conditions. Elles se distinguent principalement par leur résistance à la compression mesurée après 28j de vieillissements donnée ci-dessous :

- chaux faiblement hydraulique (NHL 2) : correspond à une résistance comprise entre 2 et 5MPa ;
- chaux moyennement hydraulique (NHL 3,5) : correspond à une résistance comprise entre 3,5 et 10MPa ;
- chaux fortement hydraulique (NHL 5) : correspond à une résistance comprise entre 5 et 15MPa.

I.6.7.2 Mortiers de chaux

Le mortier de chaux est un matériau composé principalement de liant (chaux), de sable et de l'eau dans des proportions convenables afin de satisfaire aux divers besoins techniques et économiques.

I.6.7.3 Quelques travaux de recherche sur les mortiers de chaux

Chinjemelo et Billong [81] ont étudié expérimentalement l'effet pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites sur les propriétés mécaniques des mortiers de ciment. Ils ont conclu d'après les résultats trouvés que les fines de briques (Argile calcinée) présentent une action pouzzolanique plus élevée que celles d'autres matériaux avec une augmentation notable en résistances mécaniques.

Rodrigues et Henriques [82] ont étudié l'influence de certains matériaux hydrauliques sur les performances physico-mécaniques des mortiers. Les matériaux utilisés sont le sable de rivière, la chaux hydratée pure, la pouzzolane, la cendre volante, la poudre de céramique et de kaolin calcinée à 600°C et 800°C (Rappelons que la métakaolinite est une pouzzolane de synthèse couramment utilisée dans le domaine de génie civil qui est le résultat de la calcination de la kaolinite ; cette calcination incomplète synthétise ce type de pouzzolane qui est très réactive avec l'hydroxyde de calcium). Ils trouvaient que la plus grande résistance à la compression (8MPa) a été marquée par l'argile calcinée à 800°C (Kao800H), avec un faible coefficient d'absorption ($0.08\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$), contrairement à la pouzzolane qui marque une très faible résistance à la compression (1.3MPa) et une forte valeur du coefficient d'absorption ($0.54\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$). La formulation optimale retenue est celle obtenue avec les proportions 1/1/4 (i.e. chaux/composant hydraulique/sable).

Fernando et al. [83] ont étudié l'influence du mode de malaxage et de cure sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de chaux avec et sans ajout pouzzolaniques. Deux types de composition de mortier ont été préparés, l'une avec une chaux hydratée pure (aérienne) et l'autre avec le même type de chaux, mais adjuvantée par la pouzzolane et à deux types de conservations :

a. Placer les moules dans des sachets plastiques à 20° durant 1 à 3 jours, puis on les déplace dans une chambre saturée à 20°C.

b. A une température de 20°C et 50% d'humidité relative.

D'après les résultats obtenus dans cette étude, les modes de préparation et de conservation jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers de chaux avec pouzzolane. Il a également été remarqué que les mortiers avec pouzzolane présentent des coefficients d'absorption et des taux d'absorption plus élevés que ceux dépourvus de pouzzolane ; cela est dû à la création d'une microstructure interconnectée, autrement dit, d'un réseau poreux continu qui favorise l'ascension capillaire.

Lanas et al. [84] ont étudié l'influence de la composition chimique de différents agrégats (limestone aggregates and silico calcareous aggregates) sur les propriétés mécaniques des mortiers de chaux. D'après les résultats enregistrés, ils remarquent que :

- la plus grande résistance à la compression est enregistrée avec les agrégats Ag3, Ag4 (pure limestone aggregates).

Cela est dû effectivement à leur nature qui est chimiquement semblable à la chaux ; celle-ci permet d'assurer une bonne liaison inter-faciale liant/agrégat.

Bachar [85] a étudié l'optimisation de la composition d'un mortier de chaux en vue de l'élaboration d'un béton de chaux léger à base de copeaux de bois ; il a étudié en premier l'influence de l'ajout de fines minérales sur les propriétés physicomécaniques du mortier de chaux. Cette partie a permis d'optimiser la composition de la matrice du béton de chaux. Dans une seconde étape, il a abordé le volet formulation et caractérisation d'un béton de chaux léger obtenu par l'incorporation de différentes proportions de copeaux de bois dans la matrice optimisée. D'après cette étude il a conclu que la résistance à la compression a atteint la valeur 12.24 MPa, soit un gain de résistance de plus de 325% par rapport au mortier témoin dont la résistance n'est que de 2.88MPa. Ce résultat témoigne l'effet bénéfique de l'utilisation des fines de briques issues des déchets de briqueterie dans l'amélioration de l'activité pouzzolaniques de la chaux. Il a également signalé que, sans l'ajout de ciment, les fines de briques ont permis d'augmenter la

résistance à la compression de 2.88 MPa à 8.04 MPa, soit un gain de résistance de plus de 179%. Ce résultat nous permet également de voir effectivement l'intérêt bénéfique de ce type de matériaux sur le plan économique, technique et écologique.

Kévin et al. [86] ont obtenu des résultats préliminaires concernant l'étude du comportement hydro-mécanique des mortiers composés uniquement de chaux et de poudre de pierre (en l'occurrence du tuffeau). L'objectif de cette étude est de concevoir un mortier avec de la chaux et des agrégats issus des débris de roche. En effet, en plus du fait de se rapprocher le plus possible de la composition chimique de la pierre en œuvre, l'utilisation de la poudre de roche pour la fabrication du mortier a aussi pour objectif la valorisation des déchets de carrière résultant de la taille des blocs de pierre. Les mortiers ainsi conçus à base de chaux et de poudre de pierre devront présenter des propriétés physico-chimiques, mécaniques et hydriques similaires et compatibles à celles du tuffeau. En effet, les propriétés de transfert de l'eau entre la pierre et le mortier sont un facteur déterminant pour la durabilité de toute la construction. Les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques déterminées après 28 jours sont très intéressantes par rapport à celles du tuffeau.

Elles peuvent encore s'améliorer avec le temps et donc le mortier confectionné avec une teneur en chaux, même faible ($\geq 10\%$), peut satisfaire les critères de compatibilité mortier - tuffeau. Ce facteur ne semble pas, à ce niveau de la recherche, être un paramètre déterminant dans le choix du pourcentage de chaux à utiliser.

I.7 Formulation d'un béton de sable

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques déterminés [87]. En effet, dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement à obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques. Dans le cas du béton de sable (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très élevés en ciment.

A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants, afin de minimiser le dosage de ciment. Enfin, nous pouvons dire que pour formuler un béton de sable, il faut combiner les deux paramètres : maniabilité et compacité [87]. Dans la plupart des études rencontrées dans la littérature, des compositions ont été proposées pour des matériaux bien déterminés. Les compositions optimales obtenues sont presque toujours basées sur la combinaison des deux paramètres indiqués précédemment.

I.8 Amélioration des propriétés des bétons de sable

Les bétons de sable, qui ont fait l'objet de plusieurs études, sont très utilisés, malgré leurs inconvénients, ce qui conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable. Ceci entraîne l'augmentation du dosage en ciment (non économique). En outre, les grains très fins du sable peuvent abaisser l'activité du ciment, ce qui diminue sensiblement la résistance mécanique du béton. D'autre part, à cause de la grande surface spécifique du ciment, l'absorption capillaire augmente, ce qui diminue l'imperméabilité du béton durci et augmente son retrait. Néanmoins, plusieurs recherches ont été réalisées afin d'éliminer les inconvénients du béton de sable pour lui assurer sa valeur économique, surtout dans les régions riches en sable comme le sud.

Les diverses expériences proposées dans le monde pour améliorer les caractéristiques des bétons de sable sont basées sur :

- la correction granulaire des granulats ;
- l'ajout de filler ;
- l'ajout des adjuvants ;
- le compactage ;
- l'ajout des fibres ;
- etc.

I.8.1 Quelques travaux de recherche sur l'amélioration des propriétés des bétons de sable

Bederina et al.2005 [88] ont étudié l'effet des fines calcaires sur la rhéologie et les propriétés mécaniques des bétons de sable. Deux objectifs principaux sont présents dans ce travail de recherche :

- (1) l'étude de la possibilité d'exploiter les sables locaux disponibles en grandes quantités ;

(2) la recherche d'une solution pour remplacer des agrégats grossiers dans le béton par l'utilisation des déchets de calcaire (filler calcaire afin de corriger la distribution granululaire du sable utilisé). Trois types de sables ont été utilisés : un sable de dune, un sable de rivière, et un mélange de sable de dunes et de sable de rivière dans des proportions prédéterminées. Notons qu'avec l'incorporation de petite quantité de gravier lorsque le rapport gravillon (**G**) / sable (**S**) est inférieur à **0,7 (G / S < 0,7)** on obtiendra un béton de sable chargé (Fig. I.4) [12,84].

Cette étude montre l'importance de la concentration de filler calcaire et l'utilisation d'un mélange des sables de dunes et de la rivière dans la composition du béton de sable pour l'obtention d'un béton plus pratique, plus compacte et plus résistant.

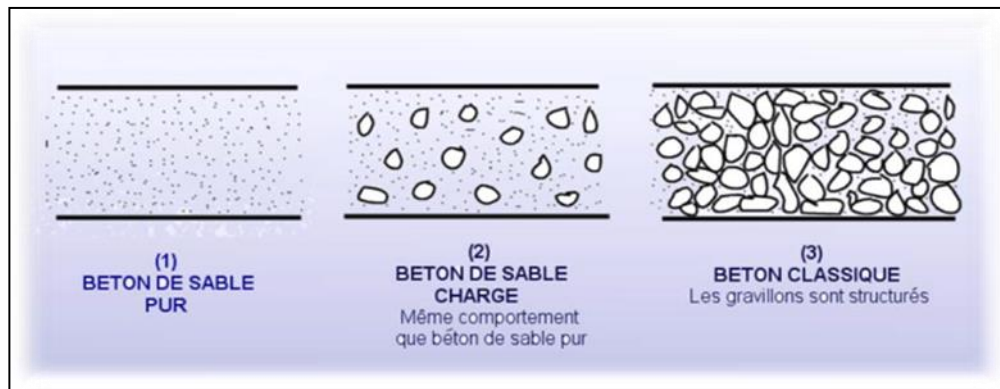


Fig. I.4 Types des bétons de sable.

Benchaa et al.2012 [89] ont étudié expérimentalement l'influence de l'environnement de conservation et de la nature du sable de la région de Laghouat sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et sur la durabilité du mortier, essentiellement vis-à-vis des agressions chimiques (Solution de sulfate Na_2SO_4 5%). Trois compositions différentes dont la variable est le sable et le dosage en eau ont été étudiées ; ces trois compositions sont :

- Un mortier de sable dunaire sans plastifiant, MSD;
- Un mortier de sable dunaire avec plastifiant (SP 40), MSDP ;
- Un mortier de sable mélange (alluvionnaire- dunaire) avec plastifiant (SP 40), MSAD.

Ci-dessous, nous mentionnons quelques résultats obtenus dans cette étude :

- Les résistances mécaniques des mortiers, que ce soit en compression ou en flexion, augmentent avec le temps, quel que soit le mode de conservation (à l'air ou dans l'eau).

- Les mortiers à base de sable mélange sont plus durables vis-à-vis de l'attaque par les sulfates que les mortiers de sable dunaire. En effet, les mortiers de sable de dunes sont plus poreux, ce qui facilite la pénétration des agents agressifs, en diminuant les propriétés liantes et les caractéristiques mécaniques des mortiers.

Bouaziz et al. [90] ont vérifié si le sable de dune (0/0.63) peut remplacer en totalité les sables alluvionnaires (0/5). Cependant, un autre sable alluvionnaire (0/5) a été utilisé (faible dosage) pour la correction de la structure granulaire du sable fin avec l'incorporation des fibres dans la formulation du béton de sable.

Parmi les résultats obtenus on note :

- L'utilisation du sable alluvionnaire dans la formulation du béton, donne des résistances supérieures par rapport à celles obtenues dans le cas de l'utilisation du sable de dune. Un gain de 30% en résistance à la compression a été observé ; même le dosage en ciment dans la formulation du béton du sable 0/5 est inférieur de 34%.
- L'utilisation des fibres de palmier dattier reconnue comme ressource naturelle renouvelable, dans la formulation des micro bétons diminue considérablement le retrait de séchage et peuvent être comparable, pendant la première semaine de cure, aux fibres synthétiques de polypropylène.
- L'introduction des fibres dans la formulation des micros bétons peut diminuer leurs maniabilités. Ceci est remarquable dans le cas de l'utilisation des fibres synthétiques de polypropylène par rapport à celle des fibres végétales de palmier dattier. Par ailleurs, les essais effectués ont montré l'effet bénéfique de la correction granulaire effectuée sur le sable de dune. En effet, il a été observé une diminution notable du retrait de séchage (54% à 7 jours).

Bederina et al.2009 [91] étudient une matrice d'un composite constitué uniquement de béton de sable dunaire. La caractérisation du béton de sable de dune allégé par ajout de copeaux de bois a permis de noter les conclusions suivantes :

- L'ajout de copeaux de bois allège considérablement le béton de sable dunaire et augmente considérablement son pouvoir isolant.
- Selon la quantité de bois, il est possible d'avoir des résistances mécaniques intéressantes.
- Selon la quantité de bois, il est possible d'avoir, donc, toutes les catégories de béton léger (porteur, isolant-porteur et isolant).

- Un modèle théorique existant a confirmé l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la proportion de bois.
- Les seuls inconvénients enregistrés sont les variations dimensionnelles et l'absorption d'eau élevée.

Bella et al.2011 [92], dans leur étude purement expérimentale pour la confection du béton de sable avec l'exploitation des différentes natures de sable, que ce soit de rivière, de concassage ou de dune, ont étudié l'amélioration des caractéristiques mécaniques du béton de sable par ajout d'addition calcaire et d'adjuvant. Les résultats obtenus sont :

Le béton de sable, par sa destination comme matériau qui peut remplacer le béton ordinaire, présente un nombre important d'avantages en matière de gain énergétique grâce au remplacement du gravier par le sable. Dans le cas du béton de sable, on doit chercher l'optimum en addition calcaire qui assure le comblement des vides de sable et l'optimum en adjuvant qui assure la défloculation totale du mélange. Dans ce cas, l'optimum en addition est d'environ 75 kg/m³ pour un affaissement de 10cm et une résistance à la compression d'environ 44.88 MPa.

- Le module de finesse des sables a une grande importance, où l'augmentation du module de finesse fait diminuer la surface spécifique du sable, et diminuer par conséquent la demande en eau.
- La distribution granulaire du sable permet le comblement d'une partie importante des vides entre les grains de sable, alors que le reste est laissé à l'addition ; c'est pour cette raison que la distribution granulaire du sable doit être étalée.
- Pour chaque composition de béton de sable (de différentes provenances), ce sont les propriétés physiques et chimiques qui font la différence en matière de résistance.

Hadjoudja et al.2011 [93] ont étudié uniquement des bétons de sable de dune renforcés avec des fibres métalliques (BSDFM). Ils ont appliqué une nouvelle technique pour tenter de remédier l'aspect négatif des bétons à base de sable (Le phénomène de retrait engendre des contraintes significatives qui peuvent donc conduire à la fissuration), ce qui les a conduit à l'ajout des fibres métalliques au sein de la matrice ; ces derniers peuvent participer, d'une manière positive, à la réduction du retrait. Deux manières sont suivies pour établir et optimiser une formulation de base :

- 1- L'utilisation du Logiciel de formulation BétonlabPro du LCPC (BétonlabPro2, 2000).
- 2- Et l'utilisation de la technique des plans d'expériences.

Les facteurs d'étude de la méthode sont le rapport 'eau sur ciment' (E/C), le dosage en filler calcaire et le pourcentage en volume de fibres et les réponses recherchées sont le retrait total et le retrait endogène des bétons de sable. Les résultats de cette recherche expérimentale font ressortir les points suivants :

- L'utilisation de la théorie des plans d'expérience a permis d'optimiser de manière rationnelle les paramètres liés à la formulation des BSDFM.
- L'optimisation du volume de fibre, du dosage en eau et du volume de fibres à travers cette étude des plans d'expériences permet de limiter l'importance du retrait et par conséquent éviter tout risque de fissuration.

L'étude de Melais et al.2011 [94] a mis en évidence le rôle et l'influence du taux de fibrage sur les caractéristiques des bétons de sable. L'incorporation des fibres dans les bétons de sable est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité de ces matériaux. Trois types de sable sont utilisés dans cette étude : sable fin siliceux et sable grossier de carrière et sable moyen de laitier granulé qui présente un sous-produit de l'industrie sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba). Les types des bétons étudiés sont :

BS 1 : béton de sable avec 100% sable de dune ;

BS 2 : béton de sable avec 100% sable de carrière ;

BS 3 : béton de sable avec 100% sable de laitier ;

BS 4 : béton de sable avec 50% sable de dune et 50% sable de carrière.

Les résultats obtenus montrent que :

- L'incorporation des fibres n'affecte pas les caractéristiques des bétons frais.
- A l'état durci, l'incorporation de ce type de fibres dans les bétons de sable est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité et de la résistance à la traction par flexion.
- L'étude montre que les résistances mécaniques sont influencées par la nature des granulats.
- Les meilleures caractéristiques à l'état frais sont données par le mélange de deux types de sables (sable de dune et sable de carrière) ; celui-ci donne un béton de bonne compacité. La nature des sables influe donc sur les caractéristiques des bétons à l'état frais par leurs caractéristiques intrinsèques.

- Une nouvelle gamme de bétons de sable léger a été définie grâce à l'utilisation du sable de laitier granulé. Ce type de béton de sable dont la densité est de l'ordre de 1.5 g/cm^3 répond à certaines exigences.

Bederina et al.2011 [95] étudient deux types de bétons de sable, (exigences de la construction, en particulier l'isolation thermique et phonique) l'un est à base de sable dunaire et l'autre à base de sable alluvionnaire. Les déchets envisagés sont des fillers calcaires et des copeaux de bois provenant respectivement des déchets de concassage et de menuiserie de bois. Les copeaux de bois ont été traités avant leur utilisation afin d'améliorer certaines propriétés. De bons résultats ont été obtenus. Le traitement appliqué aux copeaux de bois est un enrobage superficiel à l'aide d'un lait au ciment. Une partie dans ce travail est basée sur l'étude de l'effet de l'eau sur ce genre de matériau. Les principales remarques à noter sont :

- Les propriétés hydriques sont fortement influencées par la proportion des copeaux de bois incorporés.
- L'absorption par capillarité est d'autant plus forte que la proportion des copeaux de bois est élevée.
- En augmentant la teneur de copeaux de bois, les composites étudiés deviennent de plus en plus sorptifs.
- A des faibles teneurs en bois, on note une légère différence entre le béton de sable dunaire et le béton de sable alluvionnaire. Mais, à des teneurs plus élevées, les deux composites se comportent presque de la même manière. Les cycles mouillage-séchage ont légèrement marqués leur effet sur la résistance à la compression, mais avec le traitement des copeaux de bois, cette dernière est fortement améliorée.

Gadri et al.2014 [96] ont pensé à l'utilisation de la fumée de silice comme ajout dans la formulation des bétons de sable afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques (compression, traction, flexion) et voir l'effet de cette dernière sur les variations dimensionnelles (retrait). Ils ont présenté une formulation pour le béton de sable basée sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Trois séries de béton à base de sable d'oued ont été préparées en variant le dosage de filler (avec et sans superplastifiant). Le filler est de type calcaire. On substitue une quantité de calcaire par de la fumée de silice selon les pourcentages (0%, 5% et 8%). On a pu avoir des résistances à la compression élevées en comparaison avec un béton ordinaire. Les résultats obtenus dans cette étude sont:

- L'ajout de 5% fumée de silice a contribué à l'amélioration de la compacité et aux caractéristiques mécaniques de notre matériau "béton de sable" et à la réduction du retrait.
- Les observations du béton de sable avec fumée de silice (5%) au microscope électronique à balayage (MEB) montrent une microstructure très dense avec une faible porosité par rapport au béton de sable sans fumée de silice.
- La présence de fumée de silice dans le béton de sable donne une structure plus dense et fermée vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs.

Bederina et al. 2012[97] étudient cette fois-ci un béton de sable allégé par ajout de copeaux de bois traités. Deux sables différents ont été utilisés, le premier est un sable de rivière et le deuxième est un sable de dunes.

Ils ont étudié le retrait de séchage de ce matériau et ont essayé de le réduire par le traitement des copeaux de bois avant leur utilisation. Différents traitements ont été testés :

- traitement par revêtement des copeaux par un lait au ciment ;
- traitement par revêtement des copeaux par un lait à la chaux ;
- traitement par revêtement des copeaux par un lait constitué par un mélange ciment-chaux ;
- traitement par revêtement des copeaux par imprégnation à l'huile.

Les résultats ainsi obtenus ont démontré que le béton de sable est caractérisé par un retrait important par rapport au béton ordinaire. Avec l'addition de copeaux de bois, le retrait est plus élevé. Les traitements choisis pour les copeaux de bois avant leur utilisation ont montré une forte efficacité en améliorant considérablement le comportement dimensionnel du béton étudié. Des réductions importantes ont été enregistrées : plus la quantité de bois est grande, plus l'amélioration est claire. En outre, le traitement à l'huile est plus efficace que le revêtement de surface par des liants minéraux. En ce qui concerne le revêtement, le traitement à la chaux était plus efficace que le traitement au ciment. En outre, la cinétique de l'évolution du retrait apparaît très rapide dans les deux premières semaines de séchage, puis a rapidement tendance à une légère stabilisation. Enfin, l'effet des traitements sur le retrait a été comparé à leur effet sur d'autres propriétés telles que la légèreté, de résistance mécanique et d'isolation thermique.

Dans une autre étude de recherche, Bederina et al.2006 [98] ont étudié l'effet de l'addition de copeaux de bois sur la conductivité thermique des bétons de sable. Les copeaux de bois ont été incorporés dans le béton sans traitement préalable.

Les bétons de sable d'étude sont composés de sable, (dunaire, alluvionnaire), de ciment, fillers et l'eau. Les résultats montrent que l'inclusion de copeaux dans les bétons de sable réduit la densité du matériau dans une large mesure, alors que la structure reste homogène et avec une forte adhérence « bois –matrice » ; en outre, la conductivité thermique a été améliorée. Pour des petites proportions de copeaux, le béton de sable de dune a présenté une conductivité thermique légèrement meilleure que celle du béton de sable de rivière. Mais cette différence tend à disparaître à des teneurs plus élevées en bois.

De leur côté Gadri et al.2014 [99] ont remplacé les fines calcaires dans le béton de sable par des déchets de polissage de carrelage ; l'objectif visé a non seulement un intérêt économique, mais aussi un intérêt écologique qui est devenu très important au cours de la présente décennie.

Dans cette étude, un béton de sable à base de matériaux locaux (sable de Boussaâda, ciment : CPJ 32,5), a été formulé avec un dosage optimum de 145 kg/m³ de filler (déchet de polissage de carrelage). A l'âge de 28 jours une résistance mécanique à la compression qui dépasse 25 MPa avec un retrait modéré ont été enregistrés. Ils constatent un gain tant économique et qu'écologique.

Benamara et al.2016[100] proposent de rassembler les principales informations concernant l'ensemble des expériences et des études qui ont été réalisées sur les bétons de sable destinés à l'utilisation dans le sud algérien pour améliorer les caractéristiques des bétons de sable. Le but principal de cette étude est d'atteindre une bonne résistance mécanique avec une bonne maniabilité par plusieurs solutions :

- correction granulaire ;
- ajout de filler ;
- ajout des adjuvants ;
- compactage ;
- ajout des fibres.

Dans cette étude, la composition optimale des bétons de sable a été obtenue par une adaptation de la méthode expérimentale de BARON-LESAGE. Les résultats obtenus montrent :

- une amélioration par correction granulaire : l'augmentation du taux de gravier (0% - 0,25% - 0,35% - 0,45%) engendre une augmentation de la résistance à la compression et la flexion.

1. une amélioration par ajout de filler :

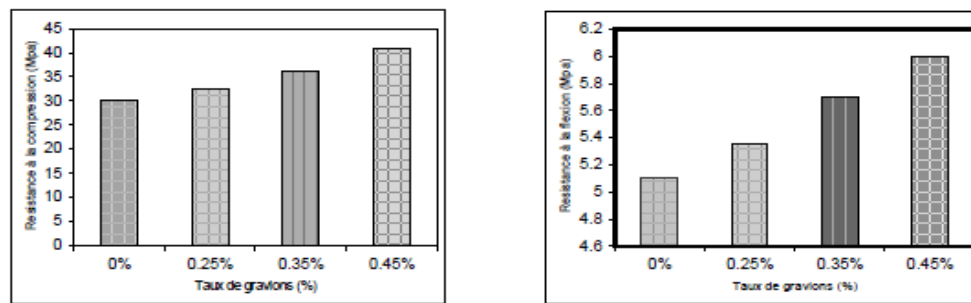


Fig. I.5 Histogramme des résistances en compression et en traction par flexion du béton sable témoin et béton de sable chargé.

- le filler calcaire ($\phi_{\max} < 125 \mu\text{m}$) avec un dosage de 200 kg/m^3 est mieux adaptée pour l'amélioration des résistances à la compression du béton de sable. Le dépassement de ce dosage cause une chute de la résistance.
- Une bonne résistance à la compression pour un dosage de déchet de polissage de carrelage égale à 260 kg/m^3 a été enregistrée. Le dépassement de ce dosage cause également une chute de la résistance, car un surdosage de filler provoque la manifestation des pores. Un effet positif sur la durabilité a également été noté.

2. Amélioration par ajout de l'adjuvant :

Différents pourcentages de fluidifiant ont été choisis afin d'améliorer la fluidité et les résistances mécaniques de ce béton. Les résultats montrent que la meilleure résistance est obtenue avec un dosage en fluidifiant égale à 1,5%. Celle-ci présente une augmentation par rapport au béton de sable (sans adjuvant) de l'ordre de 14% pour un rapport $E/C=0,69$.

3. Amélioration par ajout de fibres :

- Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de fibres métalliques dans le béton de sable augmente la résistance à la flexion, et à un degré moindre, celle à la traction par fendage. Cependant les fibres métalliques ne peuvent être considérées comme un renfort efficace vis-à-vis de la résistance du béton de sable en compression.
- Le renforcement du béton de sable par un taux de fibres de polypropylène égal à 0,3 % en poids améliore légèrement la résistance mécanique en flexion. L'ajout en fibres n'a aucun effet bénéfique sur les caractéristiques du béton de sable renforcé.

Siad et al.2005 [101] ont visé la contribution à une meilleure connaissance du liant « pouzzolane-chaux » afin de déterminer ses caractéristiques physico-mécaniques à court et moyen terme, et éventuellement son utilisation dans la confection des différents mortiers, ainsi que la confection des éléments de remplissage.

Les sables utilisés sont des sables concassés de fraction 0/2mm, provenant d'une carrière de la région ouest d'Oran (KRISTEL), corrigé par 40 % de sable de mer ; la chaux provient de l'usine de la région de Saïda ; le ciment utilisé pour la confection du mortier appartient à la classe CPA 325 et la pouzzolane est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé à 2.5km de Béni-Saf. Dans leurs résultats, ils ont conclu que :

- le pourcentage idéal d'un liant (pouzzolane – chaux) est de (75% pouzzolane + 25% chaux), avec une résistance à 28 jours de 4 MPa, ce qui est suffisant pour la majorité des mortiers de construction (Mortier pour maçonnerie, Mortier pour enduits, Mortier de pose, Mortier pour chapes, Mortier de jointoiement).
- pour la substitution de L (75% pouzzolane + 25% chaux) par le ciment, ils ont atteint l'optimum correspondant aux pourcentages de (75% de mélange (pouzzolane-chaux)+30% ciment). Cette formulation optimisée permettrait donc de fabriquer des éléments de remplissage, moins chers que ceux fabriqués par le ciment Portland.
- caractéristiques physiques du liant (pouzzolane – chaux), sont meilleurs à celle du ciment (masse volumique inférieure de celle du ciment). Et en plus de sa valeur économique, le liant (pouzzolane – chaux) est caractérisé par sa réaction lente qui conduit à un développement de la résistance à long terme.

Guendouz et al.2015 [102] ont essayé de récupérer des déchets plastiques, plus précisément des bouteilles usagées en PET et des enceintes d'emballage PEBD rejetées dans la nature, et de les incorporer dans la masse du béton de sable par substitution (cas de poudre de 10%, 20%, 30%, 40%) et par ajouts (cas de fibre de 0.5%, 1%, 1.5%, 2%). Les propriétés à l'état frais (la maniabilité, la densité) et à l'état durci (la résistance à la compression et à la traction) des différents bétons de sable réalisés sont analysées et comparées à celles des bétons de sable témoins respectifs. D'après les résultats trouvés, on peut conclure que la substitution du sable par la poudre en plastique mène à des diminutions remarquables de la densité de tous les mélanges réalisés, ainsi qu'une amélioration des performances des bétons de sable. Par ailleurs, le renforcement de la matrice cimentaire avec des fibres plastiques montrent une nette amélioration de la résistance à la traction.

Laoud .2013 [103] a mené un travail qui s'inscrit dans le cadre de la valorisation des produits locaux tels que les déchets de la carrière de concassage (sable calcaire) de la

région de Laghouat (Algérie) et les déchets issues de la fabrication des agglomérées de liège expansé.

En effet, il a utilisé ces produits dans la confection des matériaux cimentaires de construction destinés en premier lieu à l’isolation thermique. Pour étudier l’influence de la grosseur des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons, deux classes granulaires sont employées : 3/8 et 8/15. Les résultats obtenus ont montré que l’allègement du béton à base de sable de concassage avec le liège expansé diminue considérablement sa conductivité thermique, ce qui améliore son isolation thermique, mais entraîne par contre une chute de la résistance mécanique des bétons élaborés. Les bétons allégés avec les granulats de liège expansé 3/8 sont plus légers et plus isolants et possèdent des résistances mécaniques plus faibles en comparaison avec les bétons allégés avec des granulats 8/15.

Quant à Sall et al.2011[104], ils ont mis en évidence l’efficacité de l’ajout combiné de composants organo-minéraux (tuf volcanique + super plastifiant Melment F10), comme régulateur, dans le mélange de béton de sable, pour augmenter la durabilité par l’amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des revêtements routiers si on tient compte de l’évolution constante des charges des automobiles. Parmi les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, on note :

- Le rôle multifonctionnel du tuf volcanique dans la structure du béton a effectivement permis d’améliorer la durabilité des bétons à base de matériaux, à priori, de moyenne qualité dans les pays à climat chaud et sec.
- Les bétons de sable pour revêtement routier avec additifs organo-minéraux possèdent une plus grande résistance aux efforts statiques et aux chocs, une plus grande résistance à l’usure et une plus grande résistance à l’effet des attaques chimiques, du gel et du dégel, ce qui doit positivement se répercuter sur les capacités d’exploitation des revêtements routiers.

Tableau I.1 Composition et rhéologie des bétons utilisés [104]

Béton utilisé	Composition en 1 m ³ , kg						Consistance, c	Densité du mélange, kg/m ³
	Ciment	Eau	Sable (0-5mm)	Criblure de granite (<10 mm)	Melment F10	Tuf volcanique		
Contrôle (sans ajout)	467	205	726	1002	-	-	11	2400
Modifié (avec AOM)	467	177	685	957	2,34	86,4	12	2375

I.9 Bétons résineux

I.9.1 Introduction

Le béton résineux représente une nouvelle génération de matériaux qui, en dépit d'une faible consommation en liant polymérique par unité de masse, se caractérise par une grande densité, une bonne résistance aux agents chimiques [105], une bonne adhésion aux granulats, par des résistances mécaniques notamment à la traction plus élevées que les bétons hydrauliques [106]. Ceci permet l'utilisation de ces bétons dans la fabrication des éléments porteurs et structuraux et aussi dans l'industrie de la construction [107].

Les mortiers et bétons résineux se sont développés- entre la fin des années 1950 et le début des années 1960 et deviennent les matériaux de construction majeurs en Japon et en Europe vers les années 1970 et aux Etats-Unis dans les années 1980. À présent, ils sont devenus des matériaux de construction courants [108].

I.9.2 C'est quoi le polymère ?

On appelle **polymère** une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées **monomères** (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes [109].

Un **monomère** est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire. Le terme **macromolécule** est souvent utilisé à la place de polymère.

La **polymérisation** est la réaction qui, à partir des monomères, les liants forment des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules. Les noyaux des monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés [109]).

Les polymères peuvent être d'origine **naturelle** (animale ou végétale) ou d'origine **synthétique**. Les macromolécules naturelles sont les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines, etc. Les macromolécules synthétiques sont représentées par exemple par le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le PVC, le PTFE, les polyester, les polycarbonates, les polysiloxanes, les polyimides, etc [109].

I.9.3 Utilisation des polymères dans les bétons

C'est grâce au développement courant des matériaux de construction de faible coût, écologique et économique, que ce genre de matériaux a vu le jour.

Plusieurs équipes de recherche en matériaux de construction se sont orientées vers l'étude de ces matériaux [110-114]. L'utilisation des polymères est devenue un domaine de recherche des matériaux de construction durable. En fait, les polymères sont généralement utilisés dans des domaines, là où des propriétés spécifiques sont nécessaires. Leurs combinaisons avec les matériaux de construction classiques, a donné un effet synergique. Ainsi, les mélanges du béton et du polymère s'appellent des Composites de Béton-Polymère ou C-PC « Concrete-Polymer » Composites » [110,114]. Cette évolution a mené à de nouvelles applications des mortiers de réparation modifiés par polymère pour le béton, la fondation et la maçonnerie.

Une meilleure connaissance du comportement des matériaux est devenue donc indispensable [115].

L'utilisation des polymères dans les bétons se manifeste par [116] :

- Le remplacement des granulats inorganiques par d'autres organiques dans le but d'alléger les bétons et améliorer les caractéristiques liées à l'isolation thermique. Les propriétés des bétons utilisant des agrégats organiques ou inorganiques sont comparables [116].
- Le remplacement, partiel ou complet, du liant inorganique par un liant organique : le remplacement partiel de la matrice inorganique implique la présence d'une interaction entre la résine synthétique et le ciment donnant naissance à un nouveau matériau avec des caractéristiques un peu particulières ;
- L'introduction de liant organique dans la structure poreuse du ciment durci, de la roche ou du béton.

D'après Oham [117], les composites de Béton-Polymère sont généralement classés selon les principes de leurs transformations technologiques. Trois types de matériaux sont regroupés comme suit :

- Béton ou Mortier Résineux « BR ou MR » ;
- Béton ou Mortier Additionné par des Polymères « MAP ou BAP » ;
- Béton ou Mortier Imprégné par des Polymères « MIP ou BIP ».

De son côté, Blag [118] a proposé de classer les bétons de résine en deux grandes catégories. Dans la première, le liant est entièrement polymérique. Cependant, la deuxième concerne des bétons cimentaires modifiés par des polymères.

Dans cette dernière catégorie on retrouve le béton imprégné de résine, obtenu en imprégnant des éléments préfabriqués en béton cimentaire avec un monomère et le béton additionné de résine, obtenu par le remplacement partiel du ciment par un polymère.

Les mortiers de ciment aux polymères se révèlent très résistants aux agressions chimiques et à l'abrasion ; ils sont hautement imperméables à l'eau. Ils sont donc particulièrement indiqués pour des usages qui les exposeraient particulièrement à des attaques chimiques ou à des contraintes mécaniques notables et répétées. Leur capacité d'adhérence les recommande également comme mortiers de réparations aptes à s'associer à une surface bétonnée ancienne. En revanche, la présence de polymères les rend particulièrement vulnérables aux hautes températures [119]. Il convient de noter ici que nous nous intéressons particulièrement à la matrice des bétons de ciment modifiés aux polymères (*Béton additionné de résine*)

I.9.4 Béton additionné de résine

Ce béton, connu sous le nom anglophone **Polymer-Cement Concrete (PCC)** ou aussi **Polymer-Latex Concrete (PLC)**, est fabriqué en incorporant des mélanges, soit des pré-polymères de polyesters insaturés ou d'époxydes, soit des latex. Les latex sont constitués de microparticules de polymères dispersés dans une solution aqueuse. Les polymères servant à la réalisation des latex sont essentiellement le styrène-butadiène (SBR) [120,121], l'acétate de polyvinyle et les acryliques [117]. Pour effectuer la polymérisation du monomère ou du pré-polymère-monomère, un catalyseur est ajouté au mélange. La technologie transformatrice utilisée est très semblable à celle du béton conventionnel. Par conséquent, le béton de ciment additionné de polymère peut être moulé sur place, tandis que le béton imprégné par un polymère doit être employé comme structure préfabriquée.

Au Début des années 20 et des années 30, des émulsions en polymères aqueuses (Latex) ont été employées, mais leur résistance à l'altération n'était pas bonne. Pendant les années 40, les polymères synthétiques, qui se détériorent une fois exposés à l'humidité, tels que les acétates polyvinyliques (PVA), sont devenus disponibles et sont utilisés comme substitution aux Latex. Les PVA modifiés, moins susceptibles à ce type de détérioration, ont été par la suite développés. Une fois combinés avec les ciments, ils améliorent les propriétés physiques en augmentant l'ouvrabilité, la durabilité et la résistance à l'eau (latex acrylique) en plus de la résistance en flexion et en traction du béton résultant [122] pour un coût raisonnable.

I.9.5 Les latex

Les latex sont des dispersions colloïdales de polymère stabilisées dans un milieu aqueux. Normalement, les latex sont instables dans de telles conditions du fait des mouvements browniens et des forces de Van der Waals. Ils sont donc stabilisés par l'ajout d'autres polymères, hydrophiles non chargés ou chargés. Avec des polymères non chargés, la stabilisation est dite « stérique » alors que pour les polymères chargés, elle est dite « électrostatique ». Une des caractéristiques des latex est la température minimale de formation de film (TMFF). En dessous de cette température, le polymère ne peut pas former de film continu. Dans les mortiers, il est nécessaire d'avoir une TMFF inférieure à la température de cure.

Une autre température permet de caractériser les polymères, c'est la température de transition vitreuse (Tv en français, Tg en anglais). Elle correspond à la température de changement du comportement du polymère lorsqu'il passe de l'état vitreux, dur et relativement fragile à un état plus souple, se comportant alors comme un caoutchouc. Ils peuvent être sous forme liquide ou sous forme de poudre [123-127].

Dans le cas de poudre redispersible, ils sont obtenus par séchage par atomisation ou pulvérisation. Ainsi, ils peuvent mieux se disperser dans la matrice cimentaire. Un autre avantage est la possibilité de les mélanger par avance aux différents composants du mortier pour obtenir des sacs pré-formulés et pouvoir ainsi les stocker plus facilement.

Lorsqu'ils sont sous forme liquide, on parle de résines, ajoutés à un catalyseur lorsqu'ils sont combinés au mortier ou béton.

Plusieurs latex sont utilisés, comme le Styrène-Butadiène (SBR), le Chlorure de Polyvinyle (PVDC), l'Acrylonitrile-Butadiène (NBR), le Polychloropène (CR), l'Ester Polyacrylique (PAE), l'Acétate de Polyvinyle (PVAC), le poly (Styrène/Acrylate de nbutyle) (SA) ou encore le poly (Ethylène/Acétate de Vinyle) (EVA) [128 -130]. Les mortiers modifiés latex sont utilisés dans de nombreux domaines de la construction en raison de leur résistance, de leur plus grande déformabilité, adhérence au support, imperméabilité et durabilité. Dans l'industrie, on peut trouver deux grandes applications qui sont la colle à carrelage et les enduits sur isolants. Plusieurs auteurs ont proposé des modèles d'hydratation du ciment en présence de latex [131-134]. Ainsi, selon Ohama [135], il se forme une structure en réseau dans laquelle les hydrates du ciment et la phase polymérique interpénètrent pour former une co-matrice.

Lorsque le mortier contenant un latex est mélangé avec l'eau, l'hydratation du ciment se fait en même temps que la formation d'une phase pure de polymère correspondant à la coalescence des particules de polymères au moment de l'appauvrissement en eau de la matrice cimentaire. Il se forme aussi une co-matrice ciment-polymère formant un réseau où les deux phases s'interpénètrent et se lient ainsi aux granulats [135]. Ohama [135] propose un modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex. Quand le latex est mélangé au ciment, les particules de latex sont alors réparties de manière homogène dans la pâte. Durant l'hydratation, un gel de ciment hydraté se forme sur les grains de ciment anhydre et quelques particules de polymère se fixent sur ce dernier. Au fur et à mesure de l'hydratation, les particules de polymère, encore dispersées, sont de plus en plus confinées dans les pores capillaires.

Plus l'eau est consommée, plus les particules de polymère coalescent pour former un film continu qui interpénètre la matrice cimentaire [136]. Putterman décrit un modèle similaire [137]. Ce modèle a été complété par Gemert [138] en précisant la chronologie des étapes et en identifiant les différents composés formés. Juste après le mélange, les particules de ciment et de polymères sont dispersées dans l'eau, l'hydratation du ciment commence (Fig. II.1). Dans une seconde étape, une partie des particules de polymères se dépose sur la surface des grains de ciment et sur les granulats. Une partie du polymère peut coalescer pour former un film continu (Fig. I.6) qui enveloppe partiellement ou totalement les grains de ciment. Ce recouvrement retarde partiellement ou complètement l'hydratation du grain (Fig. I.6). Dans une troisième étape, l'hydratation se poursuit, la floculation et la formation d'un film sont possibles si la cure est « sèche ». Cela influence l'hydratation et le développement de la résistance au jeune âge. Dans la phase liquide, les hydrates précipitent, se combinent au polymère (Fig. I.6) et des particules de polymère restent isolées dans la matrice. Dans la dernière étape, l'hydratation et la formation du film se terminent. Le film se forme au sein des hydrates, au fur et à mesure que la quantité d'eau diminue dans les pores de la solution. C'est lors de cette phase que la plus grande partie de la déformabilité et de la résistance est obtenue pour le mortier (Figs. I.6 et I.7).

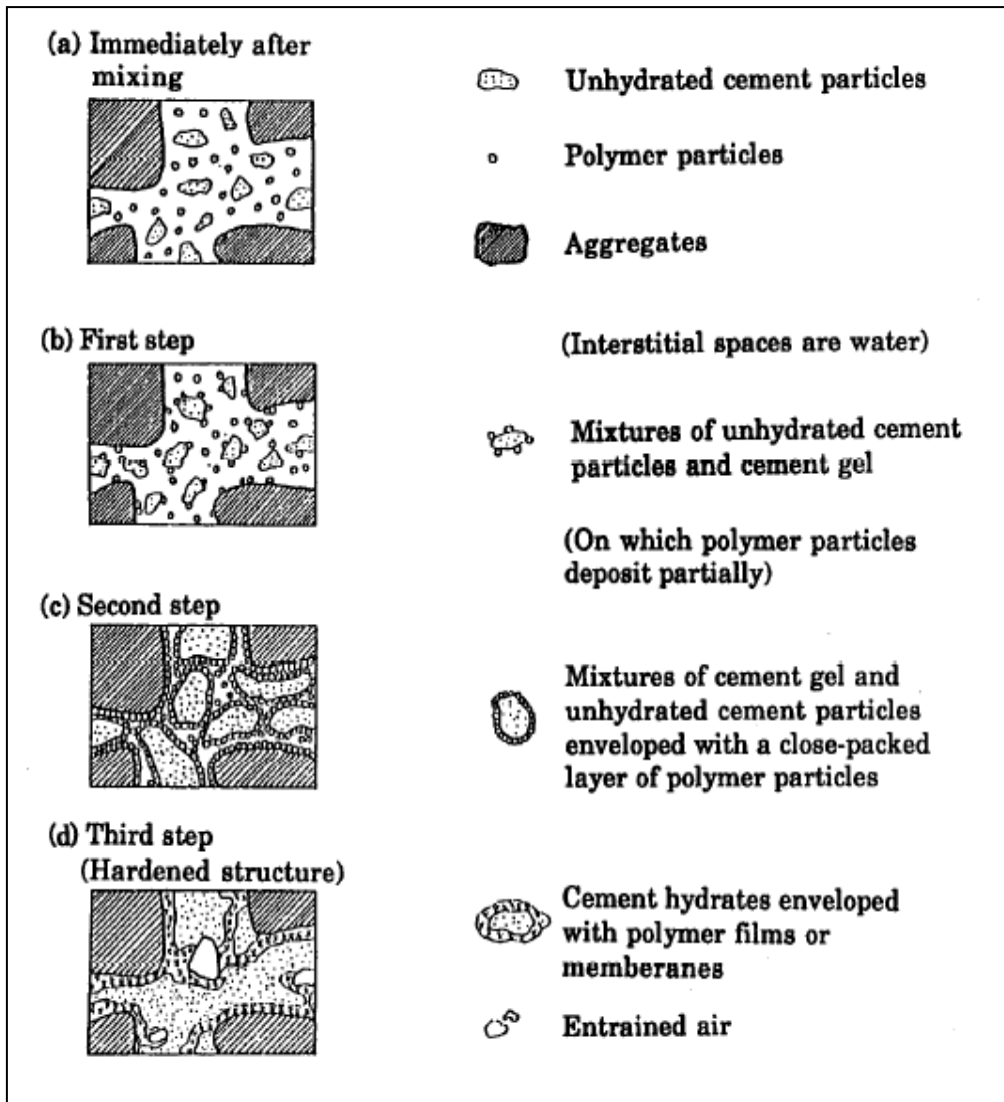


Fig. I.6 Modèle simplifié de la formation d'une co-matrice latex-ciment [139].

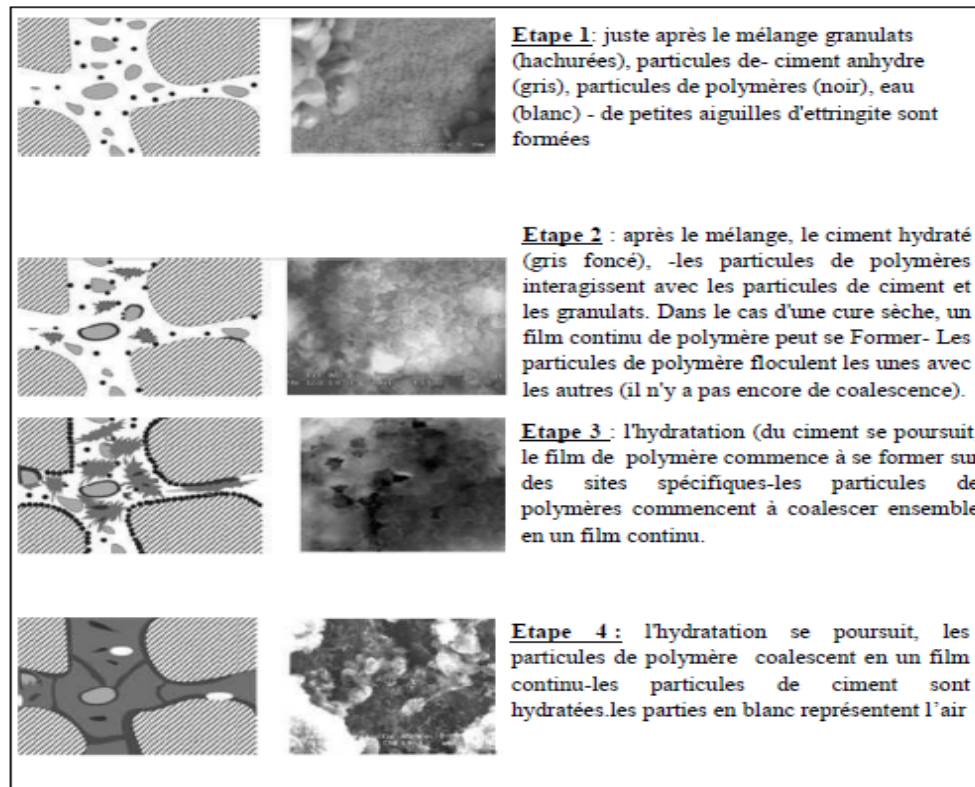


Fig. I.7 Modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de l'hydratation du ciment d'un mortier modifié latex [138].

I.9.6 Modification avec poudre polymère redispersible

Le principe de la modification du mortier de ciment et du béton avec des poudres de polymères redispersibles est presque identique à celui du latex, sauf qu'il implique l'addition de poudres de polymères redispersibles. Dans la plupart des temps, les poudres de polymères redispersibles sont utilisées par mélange à sec avec du ciment et d'agrégats pré-mélangés, suivi par voie humide en les mélangeant avec de l'eau. Au cours du mélange humide, les poudres de polymères redispersibles sont émulsionnées dans le mortier et le béton modifié, et se comportent de la même manière que les latex [139].

I.9.7 Modification de polymères hydrosolubles

Dans les modifications avec des polymères solubles dans l'eau, tels que les dérivés cellulosiques et l'alcool de polyvinyle, de petites quantités de polymères sont ajoutés sous forme de poudres ou de solutions aqueuses au mortier de ciment et au béton au cours du mélange. Cette modification permet d'améliorer leur l'ouvrabilité, à cause de l'activité de surface des polymères solubles dans l'eau et empêche les phénomènes d'"assèchement".

La prévention de «séchage» est interprétée en termes d'une augmentation de la viscosité de la phase aqueuse dans le mortier de ciment modifié et du béton et un effet d'étanchéité en raison de la formation d'un film très mince et imperméable à l'eau. En général, les polymères solubles dans l'eau contribuent peu à l'amélioration de la solidité des systèmes modifiés [139].

I.9.8 Modification avec résines liquide

Dans la modification par des résines thermodurcissables, des quantités considérables de polymères ou de pré-polymères à faible poids moléculaires polymérisables sont ajoutés sous forme liquide au mortier de ciment et au béton au cours du mélange.

La teneur en polymère dans le mortier et du béton modifié est généralement supérieure à celle des systèmes de latex modifiés. Dans cette modification, la polymérisation est amorcée en présence d'eau pour former une phase de polymère et, simultanément, l'hydratation du ciment se produit. Par conséquent, une phase de co-matrice est formée avec une structure de réseau interpénétrant de phases de polymère et de ciment hydraté, ce qui lie fortement les agrégats entre eux. Par conséquent, la résistance et les autres propriétés du mortier et du béton modifiés sont sensiblement améliorées de la même manière que dans le cas des systèmes de latex modifiés [139].

I.9.9 Modification de monomères

Le principe de la modification des composites à base de ciment avec des monomères est à peu près le même que celui de la modification par la résine liquide, sauf qu'elle comporte une addition de monomères au lieu des résines liquides. Dans cette modification, des quantités importantes de monomères sont mélangées avec le mortier et le béton de ciment, et à la fois la polymérisation et l'hydratation du ciment se produit en même temps, pendant ou après le durcissement, pour faire une matrice monolithique qui lie les granulats entre eux. Mais généralement, cette modification n'a pas été couronnée de succès à cause des mauvaises propriétés des systèmes modifiés. Les raisons de cela sont les interférences avec l'hydratation du ciment, la dégradation des monomères par les alcalis à partir du ciment et la difficulté à disperser uniformément les monomères et les autres composants pendant le mélange [139].

Le polymère utilisé dans notre étude, nommé TEKWELD provenant de l'entreprise de TECKNACHEM.

C'est une résine synthétique en solution aqueuse à haute densité, stable en milieu alcalin, spécialement conçue pour être additionnée à l'eau de gâchage des mortiers de ciment ou de plâtre.

I.10 Conclusion

Dans cette partie de la recherche bibliographique on a présenté l'historique et les principales propriétés et constituants du béton de sable ainsi que sa formulation et son utilisation.

Cette étude bibliographique a été effectuée pour faire le point sur les travaux de recherche réalisés sur les mortiers et les bétons de sable afin de bien maîtriser la présente étude.

Cette recherche bibliographique a également mis en évidence l'intérêt de l'incorporation des additions minérales dans l'amélioration des propriétés des mortiers et bétons de sable.

D'après plusieurs recherches, on peut dire que ce n'est pas seulement pour remplacer les bétons traditionnels par le béton de sable, mais aussi pour proposer une alternative, tant technique et économique qu'écologique, aux bétons usuels dans certaines applications. Le béton de sable est alors un béton ordinaire particulier ayant un fort dosage en sable avec l'absence ou le faible dosage des gravillons et, bien sûr, avec l'incorporation d'additions.

Dans ce présent travail, nous nous sommes essentiellement intéressés à l'influence de la substitution totale ou partielle du ciment par plusieurs types de liants existant dans le monde de la construction du bâtiment, tels que la chaux, le plâtre et la résine sur les propriétés mécaniques du béton de sable.

Très peu de travaux ont été axés sur l'effet de la pouzzolane sur les propriétés mécaniques des bétons de sable. Dans notre cas, on se penchera essentiellement sur cet aspect en substituant une partie du liant par la pouzzolane.

Contrairement à une idée très répandue, les applications des bétons de sable ne sont pas limitées, si l'on définit celles-ci comme des matériaux de construction porteurs, notamment dans notre région où les constructions sont de faibles hauteurs et peu étagées, et par conséquent, on n'a pas besoin de grandes résistances mécaniques. Ces matériaux permettent également de réaliser des travaux d'isolation, de réparation et de rénovation (bâtiments). En plus de ces fonctions, ils protègent et décoorent les ouvrages.

Références

- [001] Sablocrete, Projet national de recherche « développement. Béton de sable », Edition presses de l'école nationale des ponts et chaussées.1998.
- [002] Gadri k . «contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destine pour la réparation mince des structures ».Mémoire de magister, université mohamed khider, biskra.2007.
- [003] Melais F Z, Achoura D. « Formulation et propriétés des bétons de sable renforcé de fibres de polypropylène » .XXIXe Rencontres universitaires de génie civil. Tlemcen. (29- 31)(05).2011.
- [004] Benabed B, Azzouz L, Kadri E, Belaidi A S E. « Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes »XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, France Savoie. (6-8) (06).2012.
- [005] Bedrina M. « Caractérisation mécanique et microstructures des bétons de sables locaux : Effet de fillers et de la nature des sables sur le comportement du matériau ». mémoire de magister, université de laghouat .2000.
- [006] Mezidi O, Kettab R. «Comparative study of the characteristics of dunes sand only aggregate concrete and ordinary concrete modified by rubber crumb». Proceedings of 2014 international conference on advanced engineering technologies AET. Dubai. (25-26)(12). PP 237-242, 2014.
- [007] Koller E. « traitement des pollutions industrielles ». Ed. Dunod.2004.
- [008] Rezig S. «optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux». Mémoire de magister, université mohamed khider .biskra.2012.
- [009] Benabed B, Azzouz L, Damene Z. « comportement mécanique et durabilité des mortiers a base du sable de dune ». Colloque CMEDIMAT , université de Laghouat. (06 -07) (12) .2005.
- [010] Benaissa A, Aggoun S. « Contribution à l'étude du fluage propre du béton de Sable : modèle physique». Université des sciences et technologie d'Oran. Algérie.
- [011] Rapport Sablocrete, dossier de propositions, Centre d'études techniques de l'équipement du sud-ouest, laboratoire régional de bordeaux, Coopération Franco-Sovietique.1987-1991.
- [012] C.E.B.T.P « Béton de sable Rapport Interne ».1985.
- [013] Volasolo R. « contribution à l'étude du béton de sable : Applications ».mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'études approfondies (D.E.A) université d'antananarivo. (03)(8).2007.
- [014] Ayachi A M « Etude des propriétés mécaniques des bétons de sable », thèse de doctorat .2011.

- [015] Khady N. « Optimisation des formulations des bétons de sable ». Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.1993.
- [016] CIM Béton, « Les béton de sable en structure de chaussées », centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France.1995.
- [017] Guermtti L. « contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques ». Mémoire de magister, université kasdi merbah, Ouargla .2013.
- [018] Mironkov B A, Steryne V S. « béton de sable dans la construction civile de LENINGARD ». séminaire Franco-Soviétique sur le béton de sable, université de bordeaux. pp104-110. 1991.
- [019] Benaissa I. « béton de sable fibré projeté pour panneau 3d ».Thèse de doctorat, université Cergy Pontoise, France.2015.
- [020] Bentata A. « Etude expérimentale d'un béton avec sable dune de la région de ouargla (Ain Elbaida) ». Mémoire de magister, université kasdi merbah, Ouargla .2014.
- [021] ZRI A. «Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage application de béton de sable», Thèse de doctorat, université Lille 1. 2010.
- [022] Ossera O. « L'environnement éolien ».
- [023] Benaissa A. « Déformations différées d'un béton de sable ». Thèse de doctorat, France. 1992.
- [024] Ben Malek M L. « le béton de sable de dune : un matériau de construction performant pour le monde Arabe ». First arab mechanics congress, Damaascus,Syria .1997.
- [025] Azouz H. « Etude des bétons à base des sables de dune ». Mémoire de magister, université de Biskra.2009.
- [026] Dreux G, Festa J. «Nouveau guide de béton et ces constituants ». Eyrolles. P358,1998.
- [027] « Matériaux de construction » par une réunion d'ingénieur, Eyrolles. 1979.
- [028] Coquillat G . « Béton de sable de haute-performance ». CEBTP, Rapport (06).1992.
- [029] Chaouche A, Balia A. « Etude caractéristique des bétons de sable de dune ». Thèse de magister, ENP .1993.
- [030] Benaissa A. Morlier P. Viguier C. Cauvin J J . « Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics ». ITBTTP ,N°504, (06).1992.
- [031] Kettab R « valorisation du sable de dune », thèse de doctorat, ENP.2007.

- [032] Lvoviche M. « utilisation des bétons de sable à Moscou ». recueil des communications du séminaire Franco soviétique sur les bétons de sable, université de bordeaux, (6-7) (11). 1991.
- [033] Benaissa A, Viguiier C. « Estimation de la compatibilité des résultats réglementaires et expérimentaux : retrait et fluage du béton de sable ». Equipement revue technique de l'école nationale des travaux publics, Algérie, N° 8, (04). 1993.
- [034] Gmira A. « Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment ».Thèse de doctorat, université d'orléans. (10)(07).2003.
- [035] Bellferrag A. «Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans le béton de sable de dunes».Mémoire de magister, université kasdi merbah, Ouargla.2006.
- [036] Akchiche H. « Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés des fibres de palmier dattier en régions désertiques». Mémoire de magister, université kasdi merbah , Ouargla.(16)(05).2007.
- [037] Casanova P. « Béton renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure ». Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Série ouvrages d'art OA20, France. (02).1996.
- [038] Kettab R., Bali A. « Rubber modified sand concrete forwaste management ». International journal of nuclear energy science and technology IJNEST, Vol.3 N°1, PP63-75. 2007.
- [039] Bederina M. « caractérisation mécanique et physique des bétons de sable à base de déchets de bois ». thèse de doctorat, ENP. 2007.
- [040] Chauvin J J. « le béton de sable en union soviétique ». bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées N°174, (07-08). 1991.
- [041] Balayssac J P, Detriche Ch, Grandet J. « intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage ». Matériaux et constructions, Vol.26, P226,1993.
- [042] Gluais G, Bru J P. « Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable ». Bulletin de liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, NIT 3697, Paris. N°183, PP 91-95 ,1993.
- [043] Ghrieb A. « Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques ». Thèse de magistère, ENPT.1994.
- [044] « Définition du béton ». Article extrait de l'Encyclopédie Encarta .2005.
- [045] Bouhnik B. « contribution à la valorisation du sable de dune dans la formulation du béton destiné aux ouvrages hydrauliques en milieux sahariens ». Mémoire magister, université Kasdi merbah, Ouargla .2007.
- [046] CHauvin J J. « Les sables, guide pratique d'utilisation routière ». I.S.T.E.D, Paris.P74, 1987.

- [047] Haiski D, Lonescu L, Ispa T. « Tentatives d'amélioration des propriétés du béton de sable ». INIST, N°3, PP182-185, 1992.
- [048] Bendjilali kh. « cours 3ème année matériaux des constructions ». université de laghouat. 2008.
- [049] Kateb M L. « Formulation du béton de sable à base de laitier ». Mémoire de magister, université des sciences et de la technologie, Houari Boumediene. Alger. 2006.
- [050] Dreux G, Festa J. « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». Ed. Eyrolles. 1998.
- [051] Boubekeur T. « Cours en ligne : Matériaux de Construction ». centre universitaire de Tissemsilt. 2017.
- [052] Kennouche S. « Cours Matériaux De Construction chapitre 03 : Les Liants Hydrauliques ». Université de Bouira.
- [053] Gmira A. « Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment ». Thèse de doctorat, université d'Orléans. (10)(07).2003.
- [054] Sadoudi L. « Traitement d'un déchet pétrolier et étude de la valorisation du produit obtenu dans le domaine de génie civil ». Thèse de magister, ENP. 2009.
- [055] Faschan. A, Tittlebaum, M.E, Cartledge, F.K, Portier, R. « The use of organoclays to reduce organic waste volatilization during solidification hazardous waste and hazardous materials ». Vol.9, N°4, PP 345-354, 1992.
- [056] Bombléd J P. « Rhéologie des mortiers et des bétons frais ». influence du facteur ciment, proceeding of RILEM Leedes seminar, vol.1, N°3, P1-169, 1973.
- [057] Miller E W. « Blended cements - Applications and implications ». Ciment and Concrete Composites, Vol.15, N°4, PP237-245, 1993.
- [058] Gabrysiak. F. « Matériaux - Les bétons ». Cours (chapitre 4).
- [059] Shi C. « These An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans ». Canadian journal of civil engineering, vol.28, N°5, PP778-786, 2001.
- [060] Norman F. « l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage ». Cement association of Canada, Macleod, ing. P10-12, 2005.
- [061] Ramezani A. K « Engineering properties and morphology of pouzzolanic cement concrete ». PhD Thesis, university of leeds. 1987.
- [062] Yankwa D N J. « effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolyinères à base scories volcanique ». mémoire de master en chimie, université de yaoundé I. 2013
- [063] Bouglada M S. « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le

- comportement mécanique du mortier ». Mémoire de magister, université de M'sila.2008.
- [064] Komar A. « Matériaux et éléments de construction ». 3rd ed .MIR.1976.
- [065] Arya C, Buenfeld N R, Newman J B. « Factors influencing chloride-binding ». *Cement and Concrete Research* ,Vol.20, N°2, PP 291-300, 1990.
- [066] Manai K. « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants ». Mémoire de maîtrises sciences appliquées, Sherbrooke, Canada.1995.
- [067] Canmet . « Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton ». centre canadien de la technologie, des matériaux et de l'énergie .1987.
- [068] Guide technique. « Guide de formulation, de mise en œuvre et de contrôle des bétons ». Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment, Alger .2007.
- [069] Petron N. « Effet combinés des différents facteurs sur l'expansion des bétons causés par la formation différée de l'ettringite ». thèse de doctorat, université Sherbrooke, Canada.2003.
- [070] Hamida M L. « Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction ». thèse de magister, université Mentouri, Constantine.2010.
- [071] Djoudi A. « Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leur renforcements par les fibres végétales du palmier dattier ». thèse de magister, université de Laghouat. 2001.
- [072] C.N.E.R.I.B. « Recommandations pour la construction en plâtre ». Centre national d'études et de recherche intégrée au bâtiment ,2003.
- [073] Soltane M L. « Contrôle technique d'un prototype de quatre logements en plâtre à Biskra ». C.N.E.R.I.B, MATLOC, N°91, PP101-104,1991.
- [074] Sonebi M. « Opération expérimentale d'un logement construit en mortier plâtre banche à Rabat ». centre expérimentale du bâtiment .1989.
- [075] Zuber F. « Pour une construction en plâtre ». communication, lafarge ,1989.
- [076] Daligand D. « plâtre Techniques de l'Ingénieur ».traité Construction C 910 ,2002.
- [077] Festa J. « Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes ». Ed. Eyrolles.1998.
- [078] Aldebert R. « Rénovation du grand Louvre à la gloire du plâtre ». moniteur des travaux publics et du bâtiment, N°41615, PP 56-68 ,1992.
- [079] Papadakis M, Venuat M. « Industrie de la chaux du ciment et du plâtre ». Ed. dunod .Paris.1970.
- [080] Dessaint A. « Techniques et pratique de la chaux ». Éd. Eyrolles, Paris .1990.

- [081] Chinie Melo U, Billong N. « Activation pouzolannique des déchets de briques et tuiles cuites ». African Journal of science and technology AJST, science and engineering, Vol.5, N°1, PP92-100, 2004.
- [082] Rodrigues P, Henriques F. « The effect of hydraulic components on lime mortars ». XXX IAHS world congress on housing construction, Coimbra, Portugal.2002.
- [083] Fernando M A, Henriques P, Charola A E. « Comparative study of standard test procedures for mortars ». 8th International congress on deterioration and conservation of stone, Berlin. PP1521-1528, 1996.
- [084] Lanas J, Pérez Bernal J L, Bello M A, Alvarez Galindo J I. « Hydraulic Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars ». Cement and concrete research, Vol.34, N°12, PP2191-2201, 2004.
- [085] Bachar M. « Optimisation de la composition d'un mortier de chaux en vue de l'élaboration d'un béton de chaux léger à base de copeaux de bois ». Mémoire de magister, université de laghouat .2006.
- [086] Beck K, Mertz J D, Bigas J Ph, Brunetaud X, Muzahim M . « Critères de compatibilité entre des mortiers à base de chaux et des pierres calcaires à forte porosité (tuffeaux blancs) ». 25ème rencontres de l'AUGC, université de bordeaux. (23-25)(05).2007.
- [087] Chauvillard G, Bassuyaux O. « Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance Fixées » Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées LCPC, N° 205, (09-10).1996.
- [088] Bederina M, Khenfer M.M., Dheilily R.M, 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, N°35, PP1172-1179, 2005.
- [089] Benabed B, Azzouz L, Kadri E, Belaidi A S D, Soualhi H. « Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes ».XXXe rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie. (6-8)(06).2012.
- [090] Bouaziz A, Hamzaoui R, Rezigue S, Bennabi A. « Valorisation du sable de dune dans les formulations des mortiers et des bétons ». 31èmes rencontres de l'AUGC, E.N.S, Cachan. (29 - 31)(05).2013.

- [091] Bederina M, Makhloufi Z, Quéneudec M. « Allègement des bétons de sable locaux par ajout de copeaux de bois traités et non traités : caractérisation physico-mécanique et microstructure ». 1st international conference on sustainable built environment infrastructures in developing Countries SBEIDCO, ENSET, Oran. (12-14)(10).2009.
- [092] Bella I A, Asroun A, Bella N. « Influence des ajouts de type addition calcaire sur les caractéristiques mécaniques du béton de sable ». séminaire international innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, N°10-038, maroc. (23-25)(11).2011.
- [093] Hadjoudja M, Mesbah H A, Khenfer M M. « Influence de l'ajout de fibres métalliques sur le retrait des bétons de sable de dune ». XXIXe rencontres universitaires de génie civil. Tlemcen. (29-31)(05).2011.
- [094] Melais F Z, Achoura D. « L'influence du taux de fibres de polypropylène sur les caractéristiques des bétons de sable ». Séminaire international innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, N°2, P094, rabat, maroc . (23-25)(11).2011.
- [095] Bederina M, Bouziani T, Khenfer M. M. Quéneudec M. « Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois » Séminaire international innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, N°10, P021, rabat, maroc. (23-25)(11).2011.
- [096] Gadri K, Guettala A. « Etude des caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable à base de fumée de silice ». International congress on materials et structural stability, MATEC Web of Conferences, EDP sciences Vol.11, N°01018, PP001-005,2014.
- [097] Bederina M ,Gotteicha M, Belhadj B, Dheily R.M, Khenfer M.M, Queneudec M. « Drying shrinkage studies of wood sand concrete – Effect of different wood treatments ». Construction and building materials, Vol.36, PP 1066-1075,2012.
- [098] Bederina M, Marmoret L, Mezreb K, Khenfer M M, Bali A, Queneudec M. «Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling». Construction and Building Materials, Vol.21, PP662-668,2016.
- [099] Gadri K, Guettala A. « Etude du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de déchets de polissage de carrelage ». Colloque 01 Eco matériaux, (24-28) (11). 2014.
- [100] Benamara d, Redjel b. « amélioration des propriétés mécaniques des bétons de sable ». Synthèse des recherches et état de l'art en algerie. Laboratoire de génie civil, département de génie civil, université de annaba, Algérie.
- [101] Siad H, Khelafi H, Mouli M . « Comportements physico-mécaniques des mortiers et briques à base de liant (pouzzolane-chaux) ». Colloque Cmedimat, (06 -07)(12).2005.

- [102] Guendouz M, Debieb F, Kadri E. « Formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques ». 33èmes Rencontres de l'AUGC, Anglet. (27-29)(05).2015.
- [103] Laoud B. « Caractérisation mécanique et physique d'un béton léger à base de sable calcaire et des granulats de liège ». International journal of innovation and applied studies, Vol.3, N°3, PP739-748, 2013.
- [104] Sall M, tkachenko G A. « Amélioration de la durabilité du béton de sable pour revêtement routier en climat chaud et sec ». Séminaire international innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, N°10-106, rabat, maroc. (23-25)(11).2011.
- [105] ACI committee 548. « 548, 6R-96: Polymer Concrete-Structural Applications, State of-the-art report ». American concrete institute, PP01-23, 1996.
- [106] ACI committee 548. « 5481R-97: Guide for the Use of Polymers in Concrete ». American concrete institute, PP01-29, 1997.
- [107] Mikhailov KV, Patureov VV, Kreis R. « Polymer concretes and their structural uses ». Russian translation series 91, P326, 1992.
- [108] Ohama Y. « Concrete-Polymer composites- the past, present and future ». 13 th ICPIC, Portugal, PP1-14,2010.
- [109] Raskin A. « Les résines composites ». Université médicale virtuelle francophone, support de cours .2010.
- [110] Bulletin du ciment. « Substance exerçant une action chimique sur le béton » .N°12, Suisse. 1995.
- [111] Senhadji Y. « l'influence de la nature de ciment sur le comportement des mortiers vis à vis des attaques chimique acides et sulfatique ». Thèse de magister, IGCM, Oran .2006.
- [112] Achoura D, Lanos Ch, Jauberthie R, Redjel B. « Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hauts fourneaux sur la résistance des mortiers en milieu acide ». journal de physique IV, EDP sciences, France.2004.
- [113] Rossignolo A J, Agnesini V C M. « Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete». Cement and Concrete Composites , Vol.26, N°4, PP375-380,2004.
- [114] Benosman A S. « comportement mécanique et durabilité des matériaux composites mortier_polymer PET ». mémoire de magister, université d'oron.2006.
- [115] Mirouzia G, Redjela B, Jauberthie R. « Formulation et comportement mécanique de micro-bétons à matrice de résine polyester ». Nature et technologie, Sciences fondamentales et engineering, N°09, 2013.

- [116] Murhaf H. « Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde », thèse de doctorat, université de Cergy-Pontoise .2011.
- [117] Yoshihiko O. « Recent Progress in Concrete-Polymer Composites ». Advanced Cement Based Materials, Vol.5, N°2, 1997.
- [118] Blaga A, Beaudoin J J. « Le béton modifié aux résines ». Conseil national de recherches Canada, institut de recherche en construction du CNRC , CBD-241-F. Le béton de résine.1986.
- [119] Knapen E, ukowski P, Czarnecki, L. «Cement concrete and concrete-polymer composites». Areport from 11th CPIC Congress, Berlin.2004.
- [120] Shaker FA, El-Dieb AS, Reda M M . « Durability of styrene butadiene latex modified concrete ». Cement Concrete Res, Vol.27, N°5, PP711–20, 1997.
- [121] Mirza J, Mirza MS, Lapointe R. « Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates ». Constr Build Mater, Vol.16, PP365–74,2002.
- [122] Miller M. « Polymers in Cementitious Materials », Smithers Rapra Press, P192.2008.
- [123] Keddie J L. « Film formation of latex ». Materials Science and Engineering, Vol.21, PP101-170.1997.
- [124] Eckersley T, Rudin A. « Mechanism of film formation from polymer latexes ». Journal of Coatings Technology, Vol.62, N°780, PP89-100, 1990.
- [125] Goto T. « Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex». Sciences de l'ingénieur, université pierre et marie curie, Paris VI. 2006.
- [126] Brodnyan J G, Konen T. « Experimental study of the mechanism of film formation ». Journal of applied polymer Science, Vol.8, PP 687-697, 1964.
- [127] Kast H. « Aspects of Film Formation with Emulsion Copolymers ».Die macromolecular chemie, Vol.10, N°11, PP447-461, 1985.
- [128] Chandra S, Ohama Y. « Polymers in concrete ». ed. B. Raton. 1994.
- [129] Salomon M, Majcherczyk C. « Les mortiers à base de polymères sous forme d'émulsion ». Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, N°492, PP26-35,1991.
- [130] Riley V R, Razl I. «Polymer additives for cement composites: a review». Elsevier B.V. Science direct. Vol .5, N° 1, PP27-33,1974.
- [131] Eash R.D E, Shafer H H. « Reactions of polymer latexes with Portland cement concrete ». Transportation research board, washington district of columbia, N° 542, PP1-8, 1975.

- [132] Ohama Y. « Polymer-modified mortars and concretes ». Concrete admixtures handbook. Ed. Ramachandran, new jersey, noyes. Vol.7, PP337-429, 1984.
- [133] Sakai E, Sugita J. « Composite mechanism of polymer modified cement », cement and concrete research, Vol.25,N°1,PP127-135,1995.
- [134] Su Z. « Microstructure of polymer cement concrete ». Ed. D.u. press. 1995.
- [135] Ohama Y. « Polymer-base admixtures ». cement and concrete composites,Vol.20,PP189-212,1998.
- [136] Su Z, Sujata K, Bijen J M J M, Jennings H M, Fraaij A L A. « The evolution of the microstructure in acrylate polymer-modified cement pastes at the early age of cement hydration ». Advanced Cement Based materials, Vol.3, PP 87-93, 1996.
- [137] Belkhdja A. « Etude des interactions ciment – polymères dans un Matériau de construction ». Mémoire de magister , université Abou-Bekr belkaid , Tlemcen. 2013.
- [138] Gemert D V, Knapen E. « Recent Development of Concrete Polymer in Belgium ». 11th ICPIIC Congress in Berlin. 2004.
- [139] Ohama Y. « Handbook of polymer-modified concrete and mortars ». Properties and process technology college of engineering, Nihon university, koriyama. 1995.

II.1 Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre, en premier lieu, les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés durant ce projet de recherche (sables, ciment, filler calcaire, pouzzolane, chaux hydraulique, superplastifiant, plâtre et polymère). Ensuite, nous exposerons les différents essais expérimentaux utilisés pour caractériser les mélanges à l'état frais et durci.

II.2 Caractérisation des matériaux premiers

Dans ce qui suit, nous allons présenter des informations ainsi que des résultats d'essais réalisés sur les matériaux utilisés pour la préparation du béton de sable.

II.2.1 Sable

Le sable (SAD: Sable Alluvionnaire Dunaire) utilisé dans cette étude est un mélange de deux sables ; le premier est un sable dunaire (noté « SD ») provenant de la région Nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord) et le deuxième est un sable alluvionnaire (noté « SA ») ramené de l'oued M'zi (région de Laghouat). Les proportions utilisées pour la préparation de ce mélange (alluvionnaire-dunaire) ont été déterminées sur la base d'un rapport massique préalablement déterminé en corrigeant la courbe granulométrique du sable alluvionnaire par ajout de sable de dune. Ce rapport est défini comme suit [1] :

$$\text{«SA/SD»} = 1.76 \quad . \quad (\text{II-1})$$

SA" : les éléments du sable alluvionnaire dont le diamètre est supérieur à 0.4 mm ;

SD" : les éléments du sable de dune dont le diamètre est inférieur ou égal à 0.4 mm.

II.2.1.1 Analyse granulométrique

La granulométrie permet de classer et de définir les différents matériaux employés dans la construction selon la grosseur des grains qui les composent. Les résultats de l'analyse granulométrique des deux sables ainsi que leur mélange sont présentés par les courbes granulométriques de la Figure II.1. Le sable utilisé (SAD) possède une granularité préférentielle. (Une granulométrie étalée qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons et mortiers ordinaires [2].)

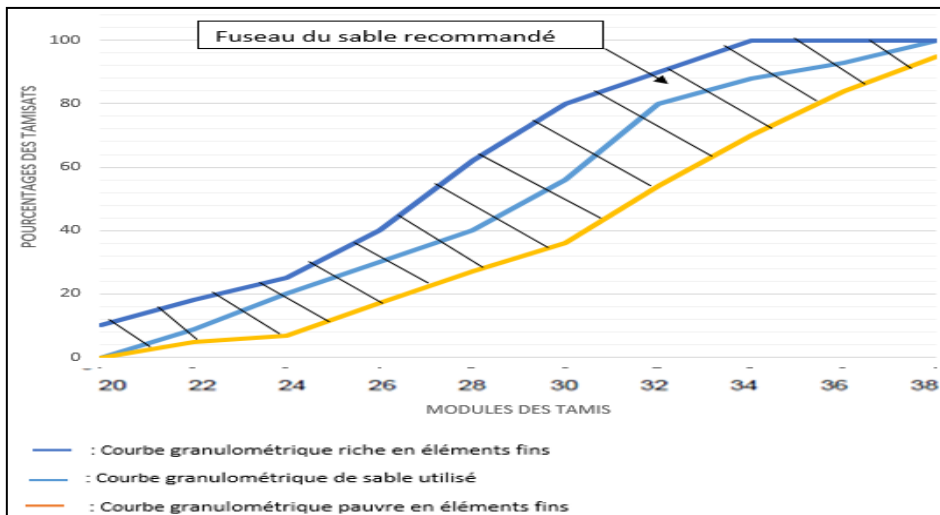


Fig. II.1 Courbe granulométrique du sable utilisé.

II.2.1.2 Analyse chimique par diffraction aux rayons X

Les spectres obtenus par diffraction aux rayons X montrent la présence de forts pics relatifs à la silice (SiO_2), ce qui prouve la nature essentiellement siliceuse du sable utilisé. Elle montre également la présence de quelques pics caractérisant le carbonate de calcium (CaO_3).

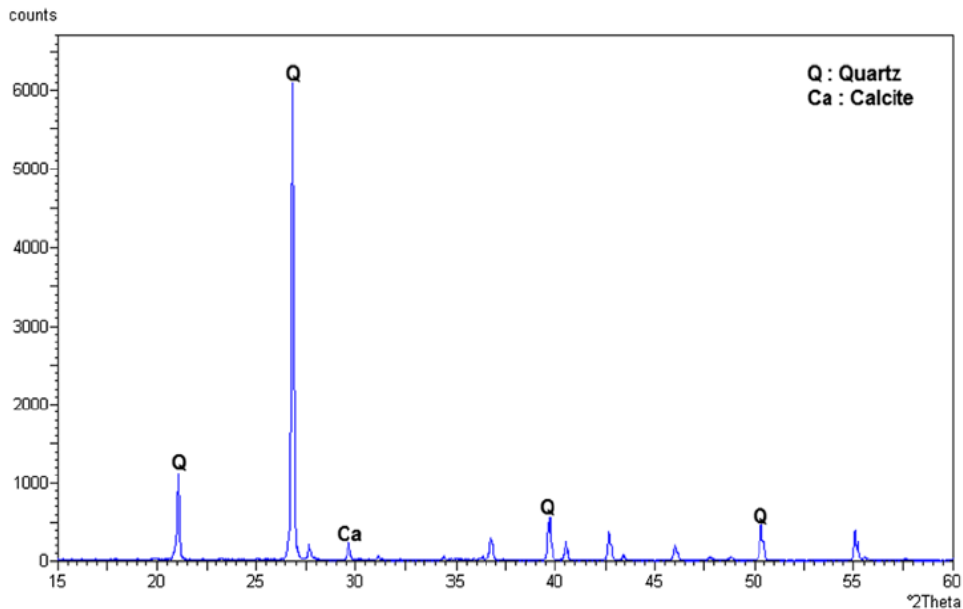


Fig. II.2 Diffraction des rayons X du sable utilisé.

II.2.1.3 Caractéristiques physiques

Le Tableau II.1 regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur le sable utilisé.

Tableau. II.1 Propriétés physiques du sable mélange utilisé (SAD)

Masse vol. app. (kg/m ³)	Masse vol. abs. (kg/m ³)	Module de finesse (%)	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable au piston	Absorption d'eau (%)
1511	2583	2.28	58	87	0.58

Le Tableau II.1 montre que le sable utilisé est très propre. Nous constatons aussi que le module de finesse de sable SAD confirme l'existence de gros grains ; rappelons ici que pour un sable à béton traditionnel, ce module est compris entre 2,20 et 2,80 [3]. On remarque aussi que le diamètre maximal est plus petit dans le cas des granulats d'un béton de sable par rapport aux granulats d'un béton traditionnel (gravier + sable), d'où le pourcentage des vides est assez élevé, ce qui impose l'ajout des fillers pour combler ces vides et éviter un surdosage en ciment [4].

II.2.2 Ciment

Le ciment utilisé pour la confection des bétons de sables est de type CEM I 42.5 N de ENFIDHA distribué par la Société des ciments d'ENFIDHA -Tunisie. Il est essentiellement constitué (98%) de clinker de Villiers au Bouin et de 2% de fines de cru. Les principales caractéristiques physiques, mécaniques et la composition minéralogique du ciment utilisé sont données dans le Tableau II.2.

Tableau. II.2 Propriétés physiques et chimique (%) du ciment utilisé

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
20.66	4.77	2.88	63.31	1.17	2.32	1.06
<i>Masse volumique absolue (g/cm³)</i>				2.9		
<i>Densité spécifique</i>				2.9		
<i>Surface spécifique Blaine (cm²/g)</i>				3000		

Tableau. II. 3 Caractéristiques minéralogiques du ciment

Phases minérales	Pourcentage (%)
C ₃ S	55.9
C ₂ S	20.2
C ₃ A	2.9
C ₄ AF	13.6

II.2.3 Filler calcaire

Dans les bétons de sable, le filler est utilisé pour compléter la courbe granulométrique du sable dans sa partie fine et à combler les vides. Les fillers utilisés dans notre étude sont de nature calcaire obtenus par tamisage (au tamis 80 µm) des restes de concassage d'une carrière située à la sortie nord de la ville de Laghouat. Rappelons que ce type de fillers est le plus adapté aux bétons de sable et donne les meilleures performances. Les principales caractéristiques physiques déterminées pour ces fillers sont montrées dans le Tableau II.4.

Tableau. II.4 Propriétés physiques du filler utilisé

<i>Masse volumique apparente (kg/m³)</i>	1530
<i>Densité spécifique</i>	2.7
<i>Blaine surface spécifique (m²/kg)</i>	280

Tableau. II.5 Propriétés chimiques du filler utilisé (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Perte au feu
0.42	0.13	0.06	56.01	0.12	0.01	0.01	0.01	0.43	0.03	4.278

II.2.3.1 Diffraction aux rayons X

L'analyse du filler calcaire par l'essai de diffractométrie aux rayons X réalisée au niveau l'université LAGHOUAT est représentée dans la Figure II. 3.

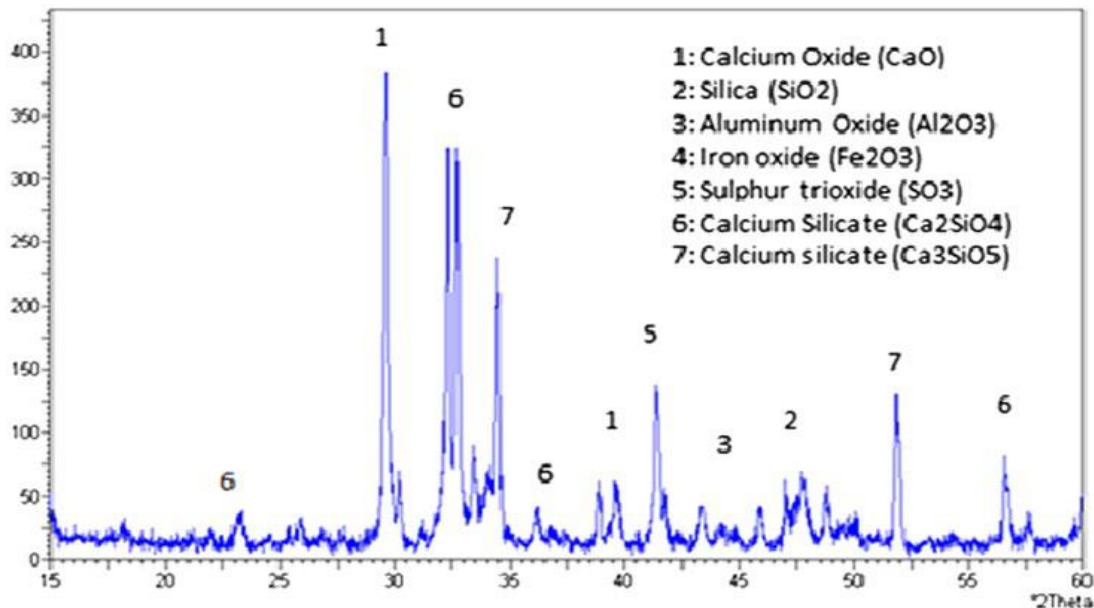


Fig. II.3 Diffraction des rayons X du filler utilisé.

D'après la figure II.3, nous constatons la présence de l'espèce CaO (Oxyde de calcium) avec un pourcentage important. Les autres valeurs de pourcentages atomiques (Ca₃SiO₅, Ca₂SiO₄) sont faibles par rapport à celui de CaO, ce qui confirme que les fillers sont de nature purement calcaire.

II.2.4 Ajouts minéraux

La valorisation des matières et déchets locaux génère un intérêt économique important. Pour donner plus d'importance à l'aspect économique en développant un nouveau béton avec un prix inférieur, une partie de ciment a été remplacé par des additions minérales moins chères. Ces dernières sont (la chaux hydraulique, la pouzzolane naturelle et le plâtre).

II.2.4.1 Chaux hydraulique

La chaux utilisée, durant notre étude, est celle de la région de Saida ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en oxydes comme les silicates SiO₂ et les aluminates Al₂O₃ et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO. Généralement, la chaux est un ajout actif. Bien qu'il soit soluble dans l'eau, il a été soumis au tamisage sur un tamis de 80 μ m pour suivre la même procédure utilisée pour la pouzzolane et le calcaire. Par essai de diffractométrie aux rayons X, la figure II.4 montre

que la chaux contient une forte concentration de l'élément de base 'CaO', ce qui donne les éléments CaCO_3 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$. L'analyse chimique menée sur la chaux utilisée est présentée sur la Figure II.4.

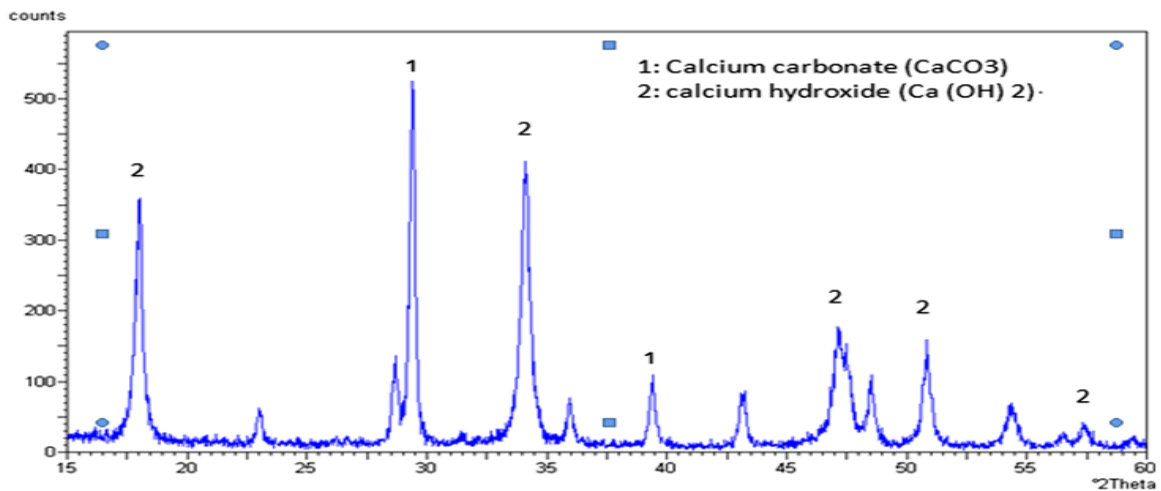


Fig. II.4 Analyse par DRX de la chaux utilisée.

II.2.4.2 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est un ajout actif d'origine volcanique provenant de la région sud de la ville de Beni-Saf en Algérie. Ce dernier est surtout une roche volcanique effusive de la composition feldspath (siliceux). Cette roche a été broyée, en utilisant la machine de Los Angeles durant une heure, puis la machine de micro-Duval durant quatre heures ; le produit est tamisé à travers un tamis de 80 μm . Les résultats des analyses minéralogiques sont indiqués dans la Figure II.5.

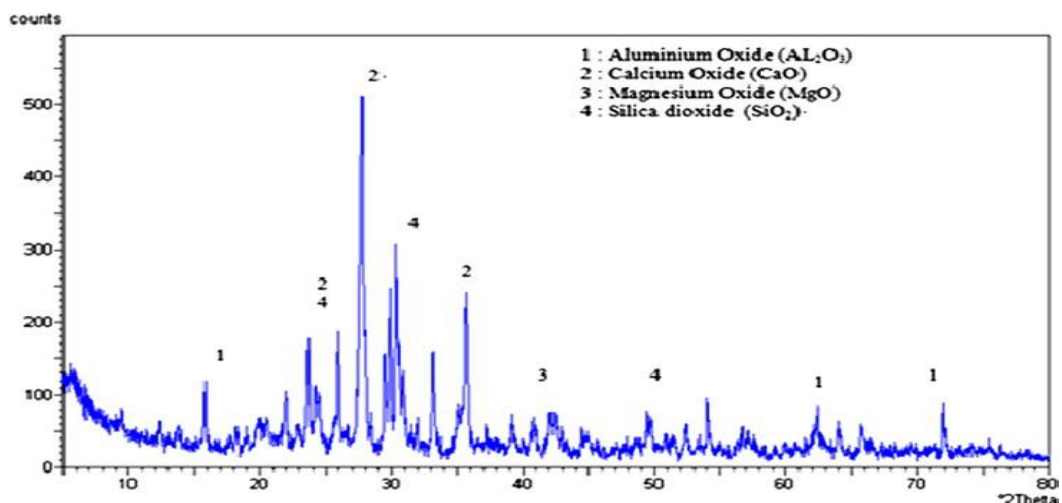


Fig. II.5 Analyse par DRX de la pouzzolane naturelle utilisée.

On remarque que la pouzzolane contient une forte concentration d'éléments de type 'CaO' et une concentration moins forte d'éléments de type 'SiO₂'.

II.2.4.3 Plâtre

Le plâtre utilisé est un produit du gypse provenant de la carrière SORECAL située à Ghardaïa ; il est disponible dans le marché. Une analyse minéralogique et chimique nous a été transmise par l'usine. L'analyse minéralogique, nous montre que le plâtre utilisé possède une forte teneur en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ (environ 96%), ce qui nous a permis de le classer en « classe I » qui correspond à une teneur en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ supérieure à 90%. Par ailleurs, l'analyse chimique révèle que les deux espèces les plus prépondérantes sont le 'SO₂' et le 'CaO', ce qui affirme que le constituant essentiel du plâtre utilisé est le sulfate de calcium. Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau II.6.

Tableau. II.6 Propriétés chimiques du plâtre et pouzzolane utilisé

<i>Constituants</i>	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	KO	CL
Pourcentage (%) Plâtre	0,70	0,10	0,08	32,15	0,53	44,95	0,09	0,03	0,002
Pourcentage (%) Pouzzolane	46,8	18,8	10,5	9,2	3,8	0,2	0,8	0,5	–

En effet, les ajouts minéraux sont la chaux hydraulique, la pouzzolane naturelle et le plâtre. Leurs propriétés physiques sont résumées dans le Tableau II.7.

Tableau. II.7 Propriétés physiques plâtre, chaux et pouzzolane.

Propriétés physique	Plâtre	Chaux	Pouzzolane
Surface spécifique Blaine cm ² /g	1500-8000	650	388
Masse volumique apparente g/cm ³	840-915 kg/m ³	666	1005
Masse volumique absolue g/cm ³	1100-1300 kg/m ³	2750	2850

II.2.5 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant algérien de type «MEDAFLOW (SP40)», produit par la société « GRANITEX » à Oued Smar (Wilaya d'Alger). C'est une solution liquide se diluant facilement dans l'eau de gâchage et d'une couleur marron. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont présentées dans le Tableau II.8 [5].

Tableau. II.8 Principales propriétés du superplastifiant

MEDAFLOW (SP40)	
Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
Ph	6 - 6,5
Densité	1,07 ± 0,01
Teneur en clore	< 0,1 g/l
Extrait	40 %

II.2.6 Eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. L'eau sert, d'une part à l'hydratation du ciment, et d'autre part, elle permet la fluidification de la pâte. Dès que l'eau entre en contact avec le ciment anhydre, elle réagit pour se combiner et former les hydrates de ciments.

II.2.7 Polymère (P)

Le polymère utilisé est nommé TEKWELD et provenait de l'entreprise de TECKNACHEM. C'est une résine synthétique en solution aqueuse à haute densité, stable en milieu alcalin, spécialement conçue pour être additionnée à l'eau de gâchage des mortiers de ciment ou de plâtre. Les principales caractéristiques du polymère utilisé sont récapitulées dans le tableau II.9 [6].

Tableau. II. 9 Caractéristiques du polymère utilisé

Caractéristiques	Forme	Couleur	Densité	pH
Polymère	Liquide	Blanc (lait)	1.05 ± 0.01	6

II.3 Techniques expérimentales

II.3.1 Formulation des bétons de sable

La composition optimale du béton de sable étudié est inspirée des travaux de Bederina [1]. Cette composition a donné un béton de sable plus compact, plus maniable et nécessitant moins de filler. On peut dire donc que le SAD a donné un bon micro-béton dans lequel le sable alluvionnaire représente le gravier et le sable de dune représente le sable.

Tableau. II.10 Composition du béton de sable utilisé

Constitutions de béton	Dosage
Ciment (kg/m ³)	350
Filler (kg/m ³)	140
Sable (kg/m ³)	1473
Eau (l/m ³)	207
Superplastifiant (en % par rapport au poids du ciment)	1.5

Dans cette étude expérimentale, on a évalué l'effet de substitution partielle et totale du ciment par d'autres liants et additions minérales (ciment, chaux, plâtre et pouzzolane.) sur le comportement du béton de sable étudié. Les liants et additions ont été envisagés séparément et en combinaisons, binaire et ternaire, en utilisant la technique des plans de mélanges. Cette dernière est une nouvelle technique qui optimise des mélanges sans être obligé de faire beaucoup d'expériences.

II.3.2 Méthode des plans d'expériences

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais, sans toutefois toucher à la qualité du produit.

La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais [7-12]. Elle permet d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique. Elle est applicable à de nombreuses disciplines et dans toutes les industries. Pour ce travail les essais sont conçus selon le plan de mélange qui est appuyé sur deux notions essentielles : l'espace expérimental et la modélisation mathématique. Les variables ou les facteurs d'étude des plans de mélanges (les liants) sont les proportions des constituants du mélange, dont la somme des proportions est égale à 100% [8-12].

II.3.2.1 Notion d'espace expérimental

La réponse est une grandeur qui est mesurée à chaque expérience ; la valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables (facteurs) [8]. La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté, les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux, l'espace ainsi défini est l'espace expérimental [13] (Figure II.6). Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. L'espace Expérimental comprend tous les points du plan « facteur X1 × facteur X 2... » (Figure II.7).

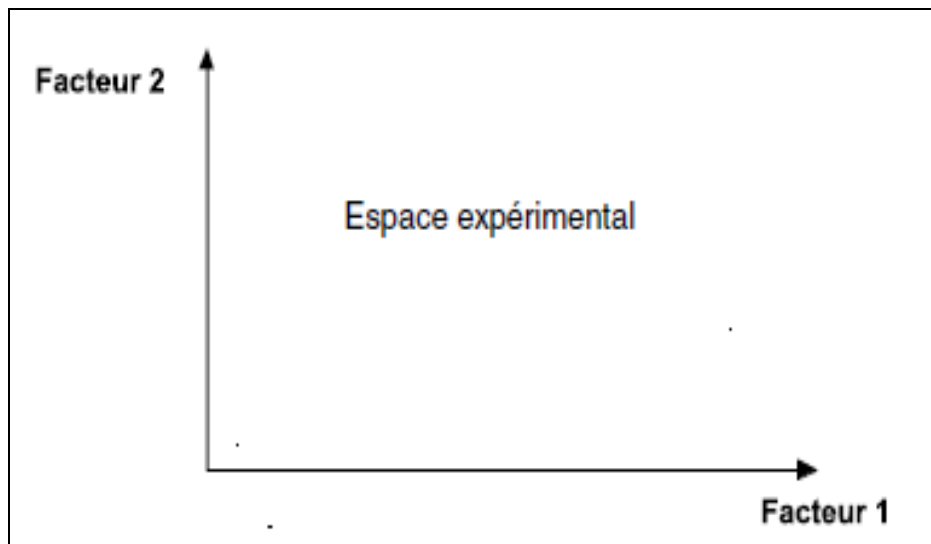


Fig. II.6 Représentation de l'espace expérimental.

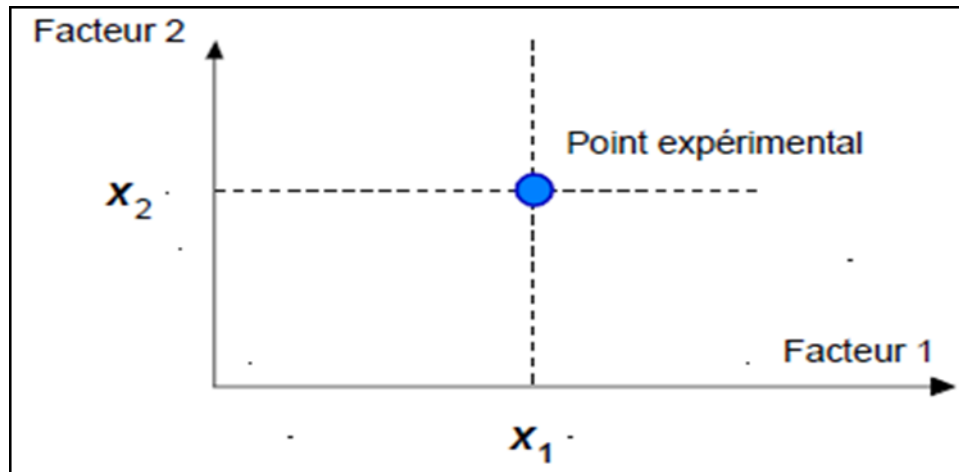


Fig. II.7 Représentation du point expérimental.

La zone de l'espace expérimental est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude ; ce dernier est défini comme suit : Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes : la borne inférieure est le niveau bas et la borne supérieure est le niveau haut. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. Le domaine d'étude regroupe les domaines des facteurs, quels que soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir, pour chaque facteur, le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé - 1 alors que le niveau haut est codé + 1 [11].

II.3.2.2 Surfaces de réponse

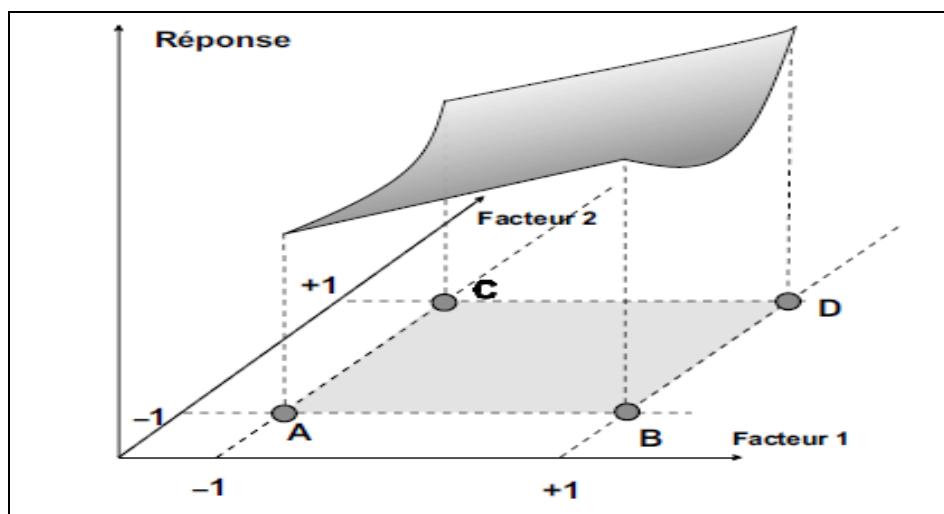


Fig. II.8 Représentation de la surface de réponse.

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond à un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse (figure II.8.).

II.3.2.3 Notion de modélisation mathématique

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. On peut dire que la grandeur d'intérêt « y » est une fonction de plusieurs facteurs « x_i » ; on a :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (\text{II-2})$$

On peut approximer la fonction (II-2) à l'aide d'un développement limité de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé [8 ,13]:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{II - 3})$$

où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a₀, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

II.3.2.4 Choix des expériences

Les plans d'expérience exigent l'utilisation de la technique de régression multilinéaire pour déterminer les coefficients d'un modèle polynômial. Ce modèle possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a 'n' équations et 'p + n' inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. Les calculs permettant de les obtenir utilisent le calcul matriciel dans le cas général et sont effectués maintenant au moyen d'ordinateurs [8 ,13].

II.3.2.4.1 Régression multilinéaire

Dans une étude expérimentale, quand on cherche à relier une grandeur physique y et une grandeur physique x , on utilise souvent une technique de régression linéaire de y par rapport à x qui consiste à définir une relation du type :

$$y = a \cdot x + b \quad (\text{II-4})$$

On cherche les valeurs des paramètres a et b de façon que la droite passe au mieux par l'ensemble des points expérimentaux. On utilise la méthode "des moindres carrés" qui minimise la somme des carrés des résidus r_i . Le résidu r_i se définit comme étant l'écart entre la valeur expérimentale y_i obtenue pour une valeur x_i et la valeur calculée à partir du modèle \hat{y}_i soit :

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad (\text{II-5})$$

II.3.2.5 Différents types des plans d'expériences

Parmi les plans d'expériences les plus classiques, nous verrons successivement les plans suivants :

- Plans factoriels complets à deux niveaux ;
- Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.
- Autres plans à deux niveaux ;
- Plans à plusieurs niveaux ;
- Plans pour surfaces de réponse ;
- Plans de mélanges ;
- Plans booléens ;
- Plans optimaux ;
- Plans pour simulations numériques.

II.4 Plans de mélanges

Les plans de mélanges ont d'abord été étudiés par des américains (Claringbold, Sheffé, Cornell [14], Snee, Marquadt, Crozier, etc.). Les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange [15]. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part.

Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants. Par exemple, la concentration d'un produit doit être au moins de 'x' pour-cent où cette concentration ne peut excéder une valeur donnée. En fonction de ces contraintes, la planification de l'étude est modifiée et elle doit être adaptée à chaque cas.

II.4.1 Contrainte fondamentale des mélanges

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

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = \% 100 \tag{II-6}$$

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité on aura :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 1 \tag{II-7}$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges.

II.4.2 Représentations géométriques des plans de mélanges

Les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes de celles utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

II.4.2.1 Représentation des mélanges à trois constituants

On utilise un triangle équilatéral pour représenter les mélanges à trois composants. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral. Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle. Par exemple, le côté gauche du triangle (Figure II .9) représente les mélanges composés uniquement des produits A et B.

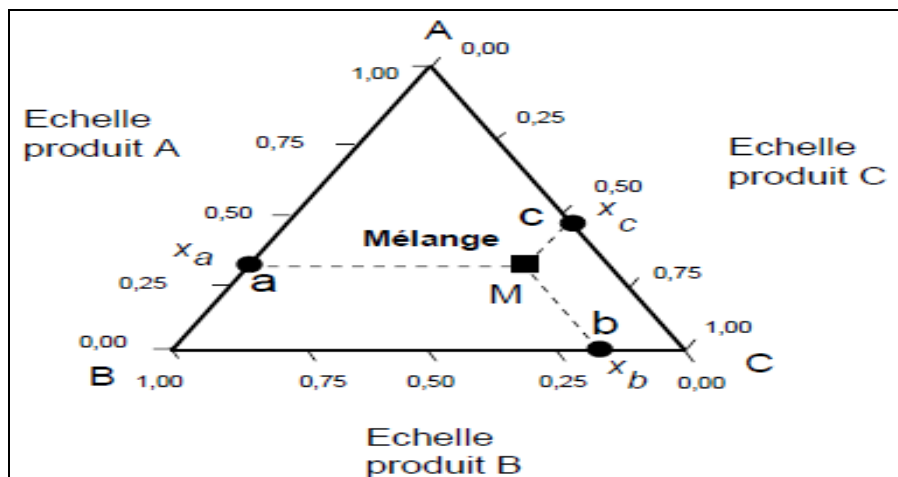


Fig. II.9 Représentation du triangle équilatéral a trois facteurs :A , B et C

II.4.2.2 Représentation des mélanges à quatre constituants

La représentation des mélanges à quatre constituants est un tétraèdre régulier (Figure 10). S'il y a plus de quatre constituants, il faut faire appel à des hyper polyèdres réguliers. Un point de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle.

Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent que la contrainte fondamentale des mélanges est bien respectée.

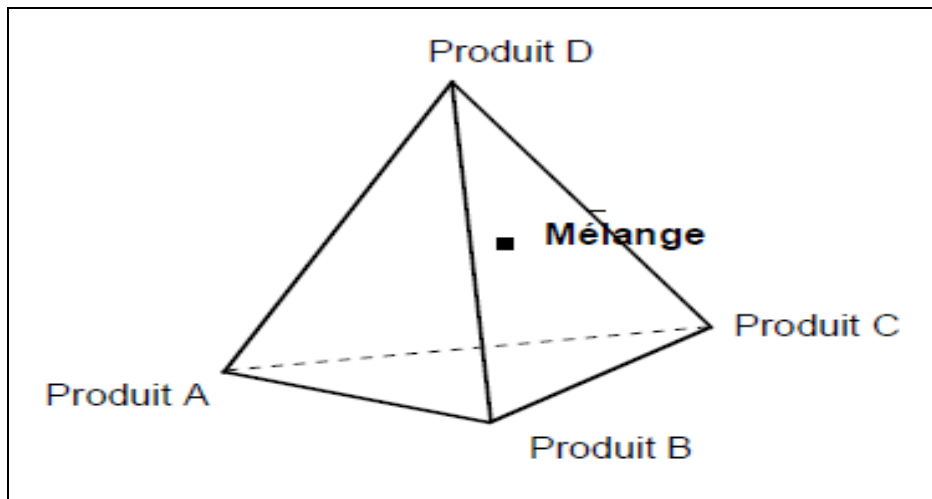


Fig. II.10 Représentation des mélanges à quatre factures :A,B,C et D
Tétraèdre régulier

II.4.3 Emplacement des points expérimentaux

Il existe plusieurs manières de disposer les points expérimentaux dans le domaine d'étude

II.4.3.1 Plans de mélanges en réseaux (Simplex lattice Designs)

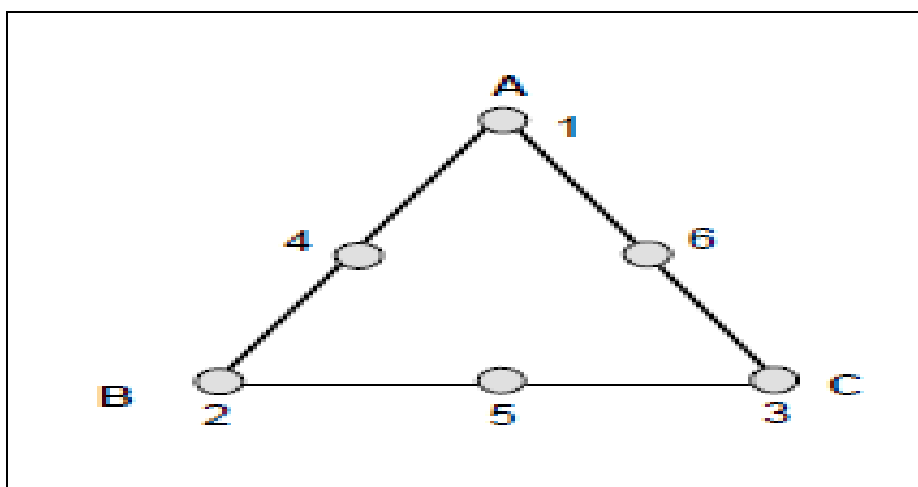


Fig. II.11 Représentation Plans de mélanges en réseaux.

II.4.3.2 Plans de mélanges centrés (Simplex-Centroid Designs)

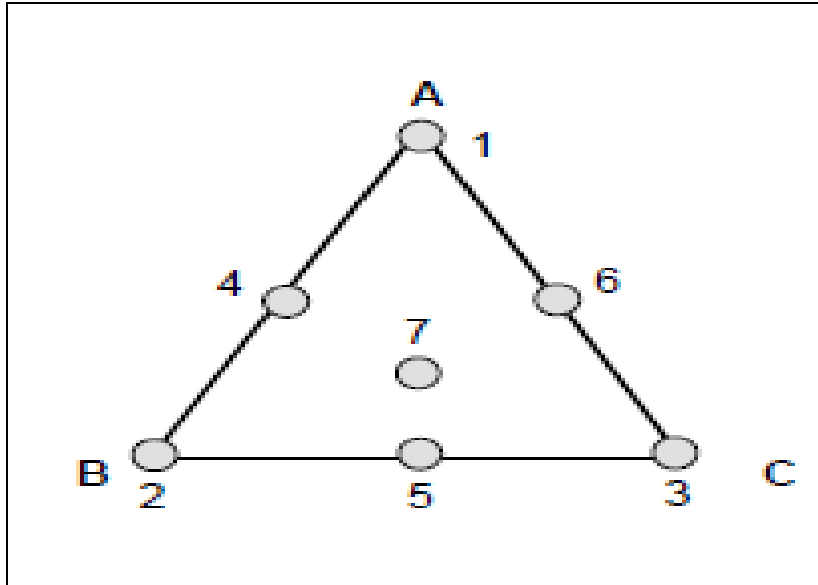


Fig. II.12 La représentation plane de mélanges centrés.

II.4.3.3 Plans de mélanges centrés augmentés (Augmented Simplex-Centroid Designs)

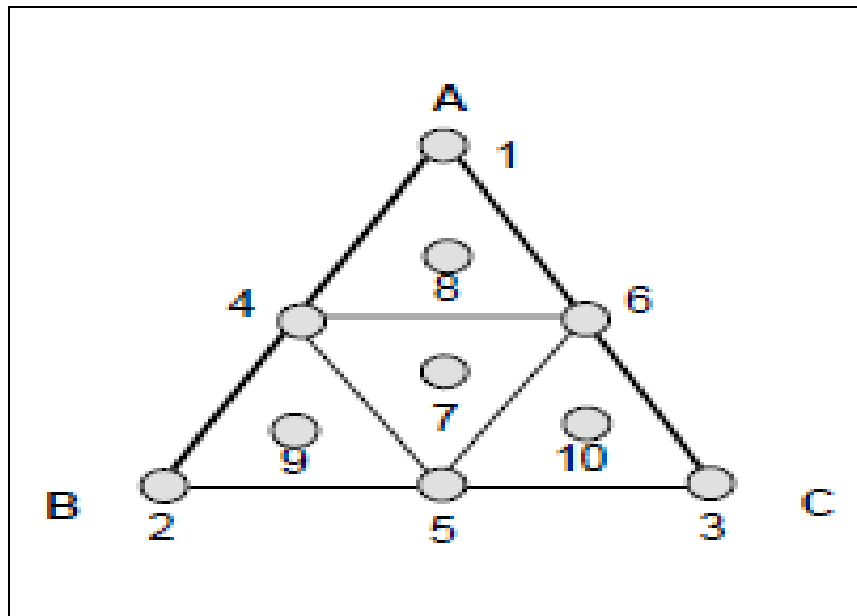


Fig. II.13 Représentation plane de mélanges centrés augmentés.

II.4.4 Modèles mathématiques des mélanges

La contrainte fondamentale des mélanges fait disparaître la constante et les termes du second degré se réduisent aux termes rectangles.

II.4.4.1 Logiciels et plans d'expériences

Les plans de mélanges et les plans avec contraintes sur le domaine d'étude nécessitent l'usage d'un logiciel pour construire le plan le mieux adapté à l'étude. On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur [16], mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel adapté qui effectue, non seulement le calcul des coefficients, mais aussi tous les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique (Coefficient de détermination, écarts-types des réponses et des coefficients, p -value, etc.).

Les logiciels de plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tout le domaine d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'iso réponses, pour construire les surfaces de réponse et pour déterminer les zones d'intérêt. Dans notre étude on s'est intéressé au logiciel JMP.

II.5 Caractérisation des bétons frais et durcis

Afin de mieux homogénéiser le mélange, ce qui contribue à une bonne qualité du béton et par conséquent le bon contrôle des différentes propriétés du produit fini, le malaxage est effectué par un mélangeur de type " CONTROLS ". Après malaxage, le matériau est introduit dans des moules de $(4 \times 4 \times 16)$ cm³. L'excès de béton est enlevé par arasement. Les éprouvettes sont démoulées après 24 h et les échantillons sont conservés jusqu'au jour de l'essai, dans la même salle où les conditions climatiques intérieures de la salle de laboratoire est plus proche des conditions climatiques des chantiers locaux, à savoir (la température, et l'humidité).

II.5.1 Caractérisation du béton frais

II.5.1.1 Essai au maniabilimètre B 18

La maniabilité du béton de sable frais est déterminée à l'aide d'appareil de maniabilimètre B (destiné aux mortiers); il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique à des dimensions connues, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

II.5.1.1.1 But de l'essai

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, ou superplastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance.

II.5.1.1.2 Principe de l'essai

Dans ces essais la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration et atteindre un niveau déterminé.

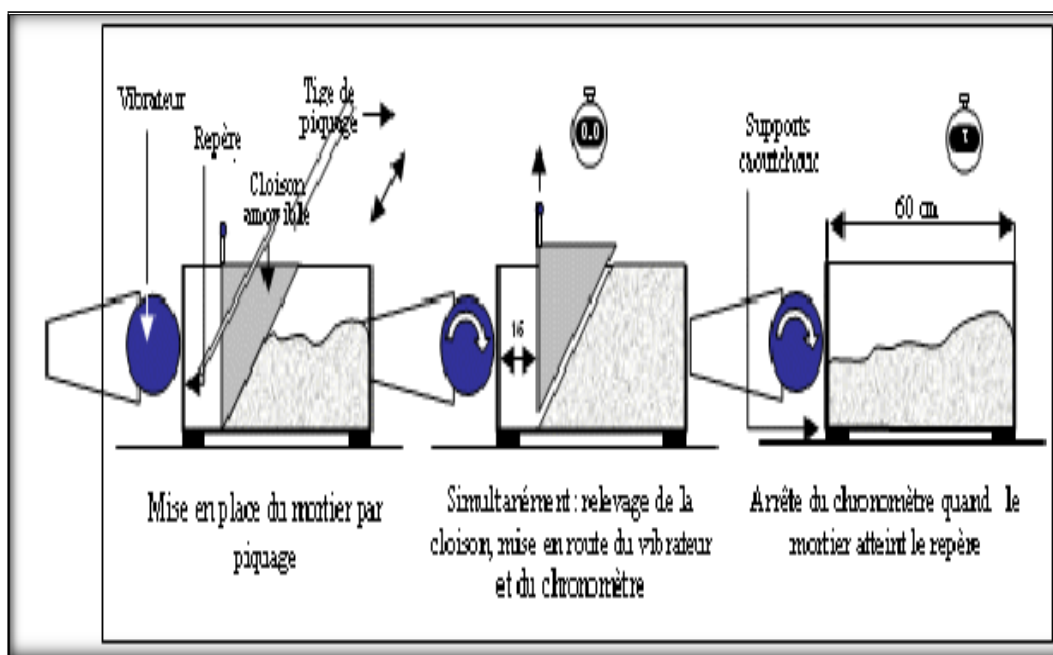


Fig. II.14 Principe de fonctionnement du maniabilimètre B [17].

II.5.1.1.3 Equipement utilisé

L'appareil utilisé est appelé " **Maniabilimètre B** " et schématisé sur les figure II.14-15. Le temps 't' mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, comme illustré au tableau (II.11).



Fig. II.15 Maniabilimètre B utilisé

Tableau. II.11 Classe de consistance selon la durée d'écoulement [16]

Classe de consistance	Durée (s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

II.5.2 Caractérisation du béton durci

La résistance à la compression est le caractère le plus important pour un béton, car, généralement, c'est sur ce paramètre que se font les estimations de la qualité du béton. C'est pour cela que dans notre étude, les essais de caractérisation du béton de sable se sont basés surtout sur la détermination de la résistance à la compression. Mais, avant de soumettre les éprouvettes (prismatiques) à la compression, nous en avons profité de faire des essais de flexion. Pour chaque composition, six éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³ ont été soumises à la flexion (3 points) pour obtenir la résistance à la flexion. Puis les demi-éprouvettes résultant de cet essai ont été soumises à la compression selon des cubes (4x4x4) cm³ afin de déterminer la résistance à la compression.



Fig. II.16 Éprouvettes prismatiques 4x4x16.

II.5.2.1 Essai de rupture par flexion

La résistance à la flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ à raison de trois éprouvettes par composition. Les éprouvettes sont soumises à un essai de flexion trois (3) points selon les normes NF EN 12390-5, (Figures II.17 et Figures II.18.) ; l'essai s'effectue à l'aide d'une machine automatique de flexion de type " CONTROLS " ayant une capacité maximale 100 kN ; la vitesse de chargement a été réglée à 5 kg par seconde jusqu'à la rupture (Figure II.19).

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi-portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. La résistance en flexion R_f (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1.5F_f l}{b^3} \quad (\text{II-9})$$

Où :

R_f : la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa ;

b : le côté de la section carrée du prisme, en millimètres ;

F_f : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons ;

l : la distance entre les appuis, en millimètres.

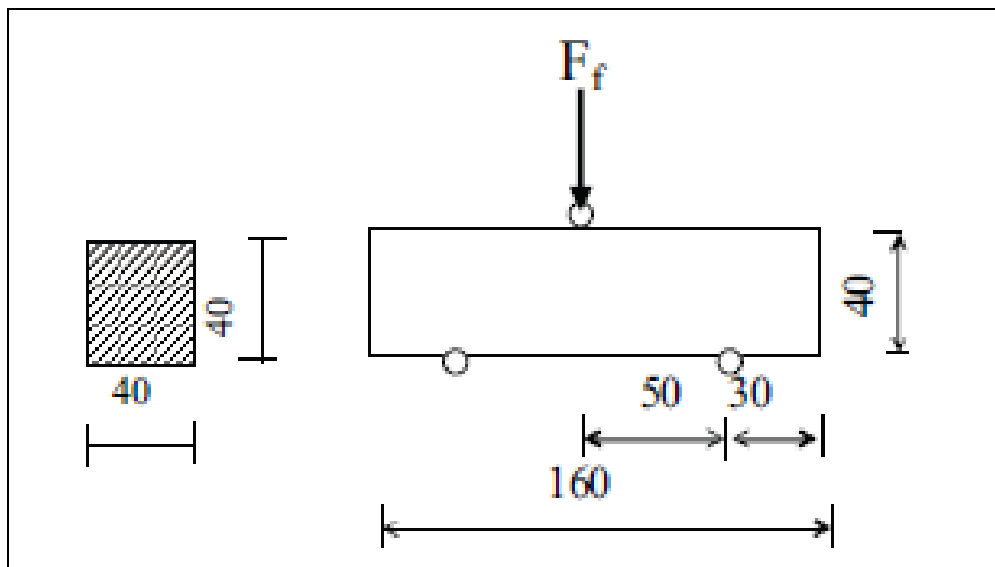


Fig. II.17 Schémas de l'essai de flexion.

II.5.2.2 Essai de compression

Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion sont soumis à l'essai de compression sur les faces latérales du moulage sous une section de $(40 \times 40) \text{mm}^2$. Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm. Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture). La résistance en compression R_c (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II-10})$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa) ;

F_c : Charge de rupture en (N) ;

b : Côté de l'éprouvette qui est égale à 40mm.

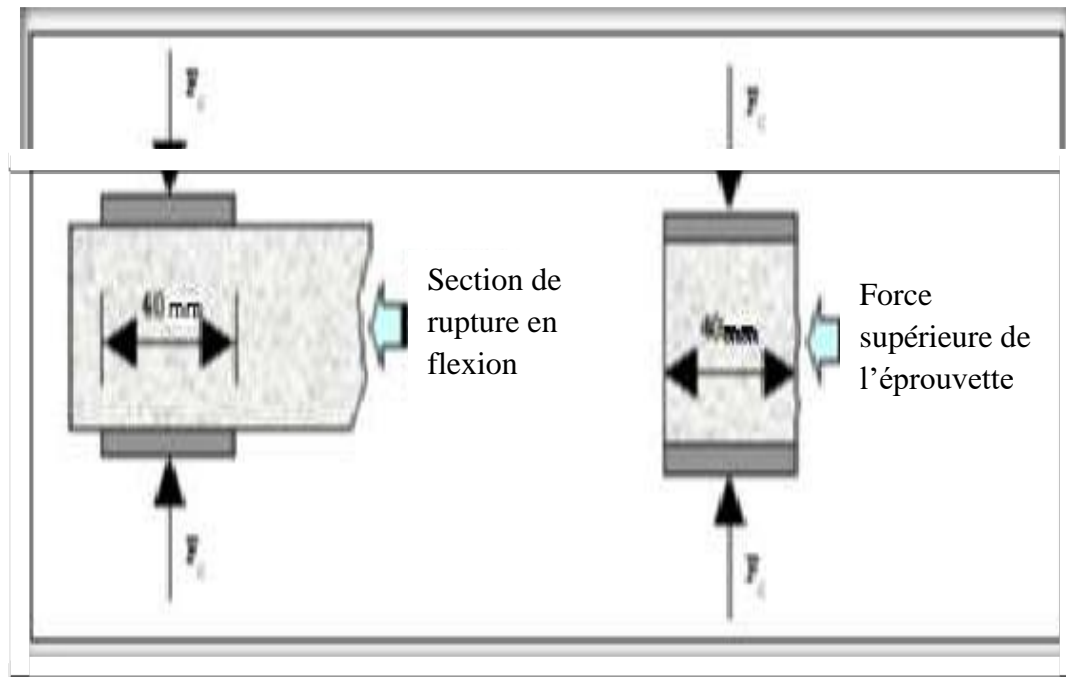


Fig. II.18 Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.



Fig. II.19 Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion.

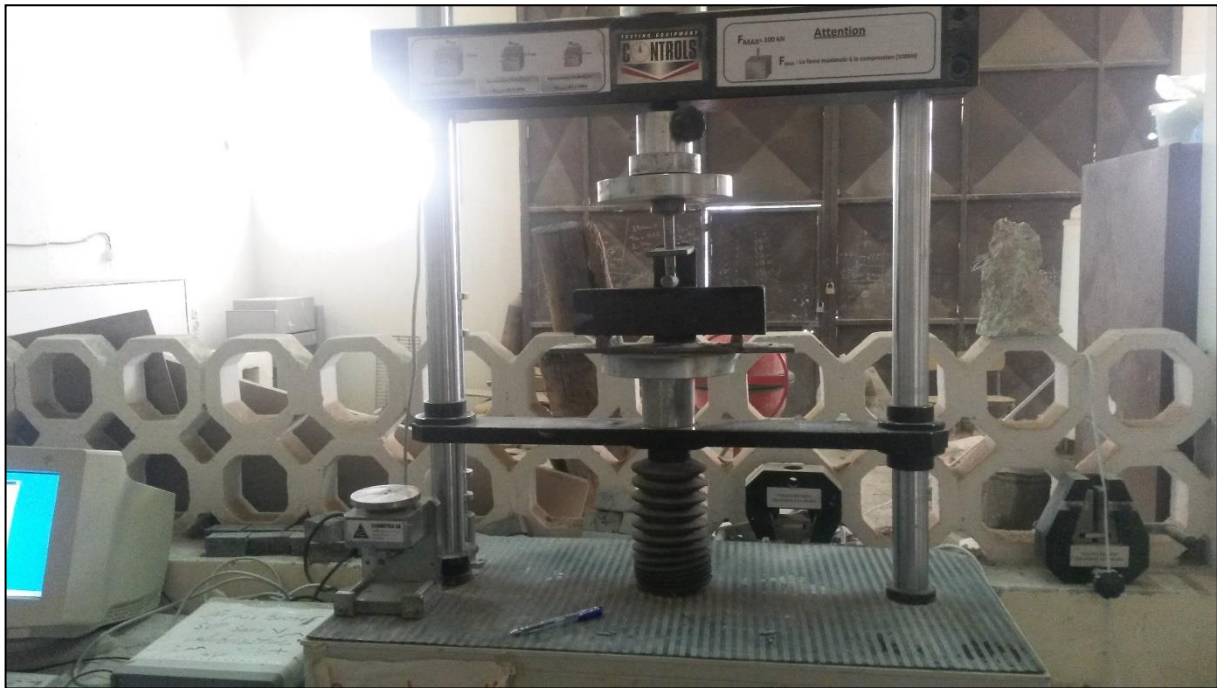
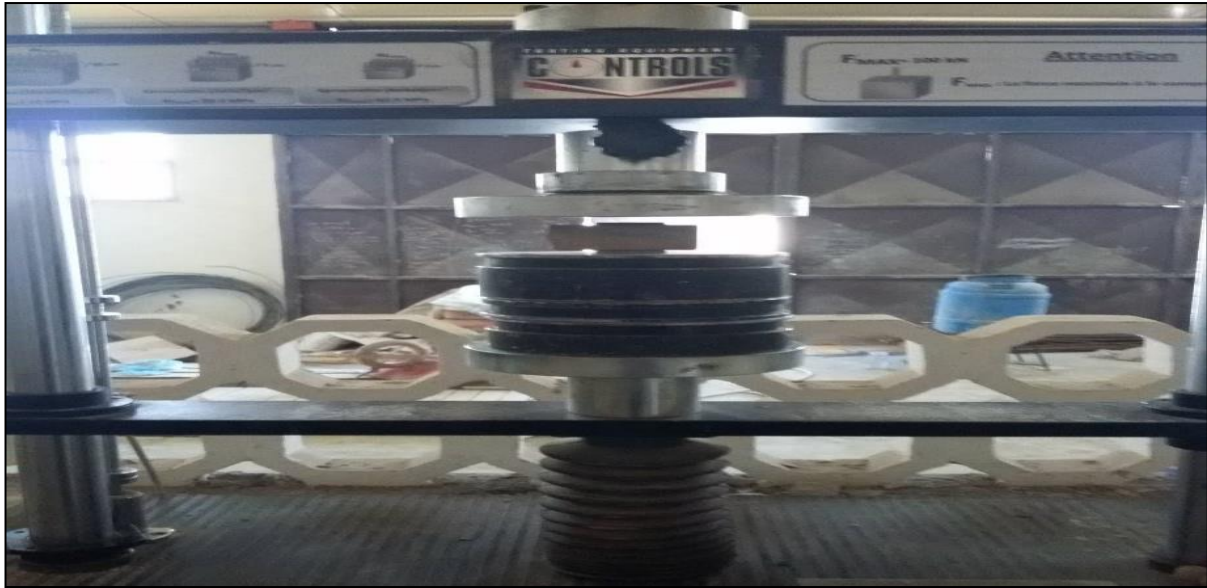


Fig. II.20 Machine automatique de flexion du type « CONTROLS ».

II.6 Etude micro-structurale

La structure des bétons étudiés a été effectuée par analyse d'images en utilisant un microscope optique où les grossissements peuvent aller jusqu' à 700x. Les observations au image-microscope ont été effectuées sur de petites surfaces d'échantillons provenant de coupe d'éprouvette (4×4×16) cm³; l'essai est réalisé au niveau du laboratoire de Mécanique à l'université de LAGHOUAT.



Fig. II.21 Microscope optique utilisé.

II.6.1 Analyse par diffraction des rayons X (RX)

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique qui ne fonctionne que sur des matériaux composés d'un nombre relativement important de cristaux aux orientations non préférentielles, tels que les minéraux, les métaux et les produits organiques cristallisés [17]. Elle ne s'applique donc pas à la matière amorphe comme les liquides, les verres et les polymères.

L'échantillon sous la forme d'une poudre, étalé aléatoirement sur une plaquette solide et plate, est bombardé par un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles de

longueur d'onde λ . On obtient par la suite le diffractogramme ou spectre qui est la courbe de l'intensité des rayons X diffractés en fonction des angles de diffraction.

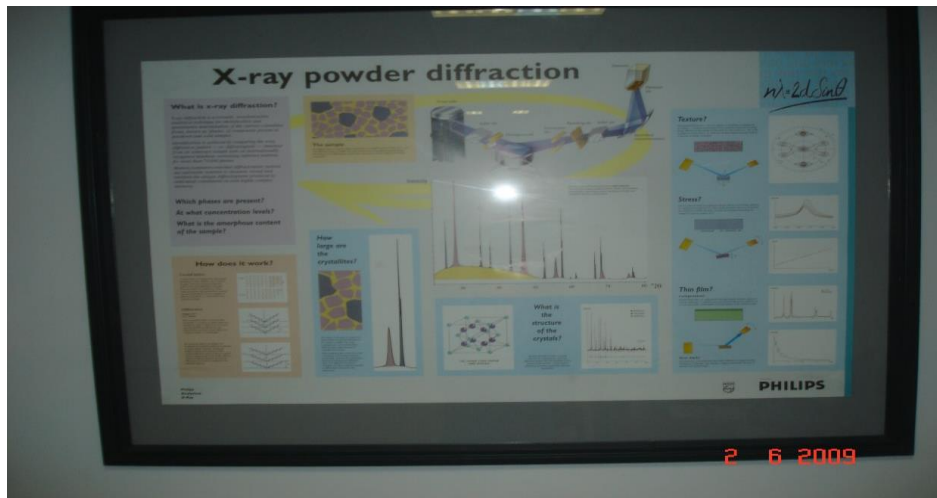


Fig II.22 Logiciel le x'pert graphic.

L'identification des principales phases minérales est réalisée à l'aide du logiciel le x'pert graphic en utilisant la base de données cristallographique Eva. La position des pics de diffraction permet l'identification des principales phases minérales et donc la détermination de la composition cristallographique de l'échantillon.

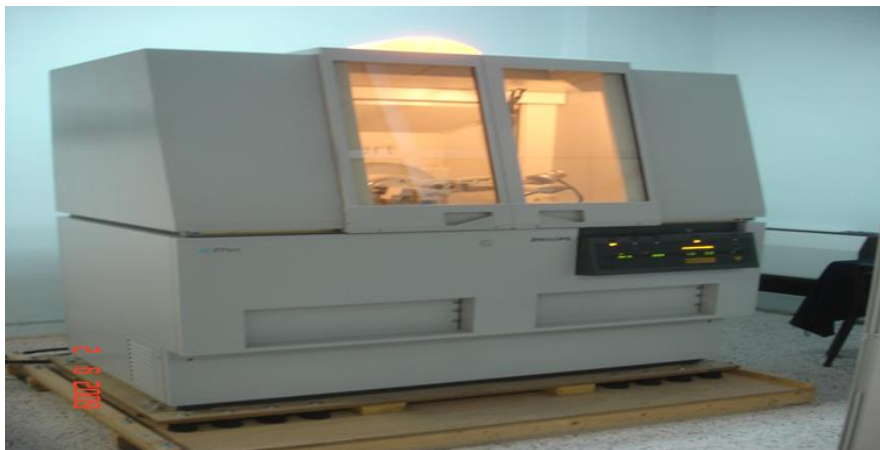


Fig II.23 Diffractomètre des rayons X (X pert Philips).



Fig II.24 Diffractomètre des rayons X (X pert Philips).

II.7 Conclusion

L'utilisation des ajouts cimentaires dans l'industrie des bétons a ouvert de grandes portes d'investigations aux chercheurs pour apporter leurs contributions et leur savoir-faire. C'est dans ce contexte donc que cette étude a été entreprise. Il s'agit d'une contribution à l'étude de l'effet de quatre additions qui sont la pouzzolane naturelle, la chaux, le plâtre et le polymère, sur le comportement du béton de sable. Pour mener à bien ce travail, purement expérimental, différents bétons de sable alluvionnaire-dunaire à base de liants ternaires ont été confectionnés. Pour la combinaison des liants, une nouvelle technique d'optimisation a été utilisée ; il s'agit de la méthode des plans de mélanges.

Il convient de noter que l'incorporation des ajouts dans les mélanges a été effectuée par substitution massique du ciment.

En effet, dans le présent chapitre, nous avons présenté les différents essais de caractérisations physiques, mécaniques et chimiques des matériaux de base ainsi que la méthode de formulation adoptée pour l'élaboration du béton de sable alluvionnaire-dunaire étudié, avec bien sûr, les résultats ainsi obtenus. Rappelons qu'une bonne partie de ce chapitre a été consacrée à un aperçu détaillé sur la méthode des plans de mélanges qui a été utilisée pour l'optimisation des essais réalisés et pour la modélisation de différents paramètres étudiés.

Ensuite les techniques de mesures des différentes propriétés des bétons étudiés ont été présentées. Les principaux essais réalisés sont l'essai de la maniabilité à l'état frais et les essais mécaniques, de flexion et de compression, à l'état durci.

Enfin, les techniques, qui ont été utilisées pour l'analyse des phases minérales et de la structure des bétons étudiés, ont également été présentées ; soient la diffractométrie aux rayons X (DRX) (réalisées au laboratoire de physique à l'Université de Batna) et la microscopie optique (réalisée au laboratoire de mécanique à l'Université de Laghouat). En effet, ces analyses présentent un outil efficace très important permettant de bien apprécier la microstructure du matériau avec ses différentes phases minérales ainsi que ses défauts éventuels.

Références

- [1] Bedrina M. « Caractérisation mécanique et microstructures des bétons de sables locaux, Effet de fillers et de la nature des sables sur le comportement du matériau ». mémoire de magister, U. Laghouat .2000.
- [2] Dupain R, Lanchon R, Saint Arroman J C. « Granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ». Collection CAPLIEZ. ED. Casteilla, V235, Paris .2000.
- [3] Dreux G, Festa J. « Nouveau guide du béton et de ses constitutions ». Ed. Eyrolles. Paris, France.1998.
- [4] Chauvin J J, Grimaldi G. « Les bétons de sable ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°157 (09).1988.
- [5] Notice Technique « MEDAPLAST-SP30 ». Granitex, P93, 2008.
- [6] « Fiche technique tek weld résine synthétique d'adhérence et multi usages ».TEKNACHEM, algérie sarl (01).2016.
- [7] Goupy J, Creighton L. « Introduction to design of experiments with JMP examples ». 3rd ed. Cary, NC: SAS Institute nc. 2007.
- [8] Goupy J. « Plans d'expériences (design of experiments) ». MODULAD Journal N°34, PP37–79, 2006.
- [9] Yahia A, Khayat K H. « Experiment design to evaluate interaction of high range water reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout». Cem. Concr. Res, Vol.31, PP749–757, 2001.
- [10] Claude C J, Chassaing J P. « introduction à la méthode des Plans d'expériences Par la méthode Taguchi », Génie électrotechnique Compléments au cours d'asservissement. C.N.E.D.
- [11] Triboulet Ph. « notions de bases sur les plans d'expériences », Lycée niepce–Chalon sur Saône .2008.
- [12] Bouziani T. « Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach ».Constr. Build.Mater.Vol.9, PP308-314, 2013.
- [13] Goupy J, « introduction aux plans d'expériences Avec applications » . 5éme ed.2013.
- [15] Goupy J. « Plans d'expériences : les mélanges. ». ISBN 2 10 004218 .1. Paris. 2000.
- [14] Cornell John A. « Experiment with mixtures: designs, models, and the Analysis of mixture data » John Wiley and Sons. New-York.1981.

- [16] Morineau A, Chatelin Y M. « L'analyse statistique des données : apprendre, comprendre et réaliser avec Excel ».Ed. Ellipses .2005.
- [17] Fantozzi-Merle C. « Etude de matériaux à base de liant hydraulique contenant des Polluants organiques modèles : propriétés structurales et de transfert ». Thèse de doctorat, INSA Lyon, P.270, 2003.

III.1 Introduction

Le présent chapitre a comme objectif principal de montrer la faisabilité d'utiliser les approches expérimentales basées sur la technique des plans d'expériences pour établir une modélisation plus ou moins réaliste des réponses envisagées en fonction des paramètres de l'étude. Cette modélisation a été réalisée grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7 de Statistical American Systems SAS-Institute. Ce logiciel JMP7, qui a accompagné notre recherche, fait partie des versions les plus récentes dans le domaine des plans d'expériences ; il est édité par SAS (Statistical American Systems). Il permet de réaliser facilement les calculs et de tracer les diagrammes des réponses en fonction des paramètres de l'étude. La technique prend en considération l'effet de chaque paramètre, séparément et en interactions avec les autres paramètres.

Nous allons, dans ce qui suit, diviser ce chapitre en deux grandes parties A et B.

Partie A : Etude physicomécanique

III.2 Etude physicomécanique

III.2.1 Etude d'un béton de sable à liant unique

Dans cette partie d'étude, nous allons d'abord étudier les bétons de sable à l'état séparé, c.à.d. avec un seul liant, 100% ciment, 100% chaux ou 100% plâtre.

III.2.1.1 100% Ciment

Ce béton est considéré comme le BS témoin. Il est à rappeler que dans ce cas, les proportions de tous les autres composants du BSAD (Agrégat, Filler, et eau) restent constantes (Tableau III.1).

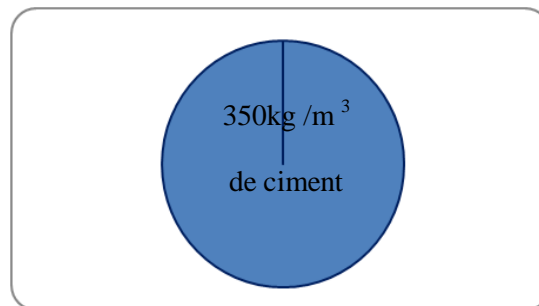


Fig. III.1. Dosage initial du ciment.

Tableau III.1 Composition de base du béton de sable utilisé [1]

Constitution de béton	Dosage
Ciment (kg/m ³)	350
Filler (kg/m ³)	140
Sable (kg/m ³)	1473
Eau (l/m ³)	207
Super plastifiant (%)	1.5

III.2.1.1.1 Etude de la maniabilité

Comme pour tous les bétons, le rapport E/C a une grande influence sur la maniabilité et sur la résistance, d'où la nécessité de déterminer le rapport E/C qui assure en même temps, la facilité de la mise en œuvre et la résistance convenable.

Comme nous l'avons signalé précédemment dans le chapitre II, le maniabilimètre LCL a été utilisé pour la mesure de la maniabilité.

Tableau III. 2 Maniabilité du béton de sable étudié (100% ciment)

Echantillon	Classe de consistance	Durée (s)
SC 09	Très plastique	$10 < t \leq 20$

III.2.1.1.2 Caractéristiques mécaniques

Les essais ont été réalisés en deux âges différents 7 et 28 jours. Le nombre d'éprouvettes était égal à chaque fois au nombre de six. La moyenne de mesure obtenue en compression R_c et en traction R_t est présentée dans le tableau III.3.

Tableau III. 3 Résistance mécanique du béton de sable étudié (100% ciment)

Echantillon	Rf en MPa à l'âge de		Rc en MPa à l'âge de	
	7j	28j	7j	28j
SC 09	2.89	3.60	29.13	36.23

D'après les tableaux ci-dessus nous remarquons que :

En ce qui concerne la maniabilité, l'expérience montre qu'il est possible de retenir des consistances un peu plus fermes avec les bétons de sable qu'avec les bétons classiques pour permettre des mises en œuvre comparables. Cette possibilité est obtenue grâce à la petite granularité du béton de sable. De plus, le dosage en eau a été relativement réduit par l'utilisation d'un superplastifiant dosé à 1.5 % du poids du ciment, ce qui nous a permis de retenir les compositions donnant la compacité maximale.

Rappelons que l'utilisation d'adjuvants (un bon réducteur d'eau pour limiter le rapport E/C et un bon plastifiant pour augmenter la maniabilité) pourrait améliorer les performances du béton de sable.

Les dosages optimaux des différents constituants du béton de sable étudié ont donné un béton de sable plus compact, plus maniable et nécessitant moins de filler.

III.2.1.2 100% Chaux

La chaux est le plus ancien liant hydraulique ; il a déjà été employé par les Romains. Il y a quelques temps, on a commencé dans quelques pays en voie de développement à substituer le ciment Portland par la chaux. Aussi dans notre pays, ce liant a été utilisé et a même conduit à des économies substantielles en matériaux.

Dans ce cas nous essayons de garder le même dosage de liant avec le premier cas (cas de ciment), c.à.d. une substitution totale du ciment avec la chaux. La teneur en eau va être variée afin d’obtenir une bonne maniabilité.

III.2.1.2.1 Maniabilité

Il est à rappeler que les essais de cette partie d’étude ont été réalisés à maniabilité fixe comme le montre le tableau III.4.

Tableau III. 4 Maniabilité du béton de sable étudié (100% chaux)

Echantillon	E/Ch	Classe de consistance	Durée (s)
SC 03	0.96	Plastique	10<t≤20

III.2.1.2.2 Caractéristiques mécaniques

Le tableau III.5 et la figure III.2 illustrent les caractéristiques mécaniques ainsi obtenus.

Tableau III. 5 Résistance mécanique du béton de sable étudié (100% Chaux)

Echantillon	Rf en MPa à l’âge de			Rc en MPa à l’âge de		
	7j	28j	90j	7j	28j	90j
100% chaux	0.35	0.44	0.79	0.60	2.45	2.60

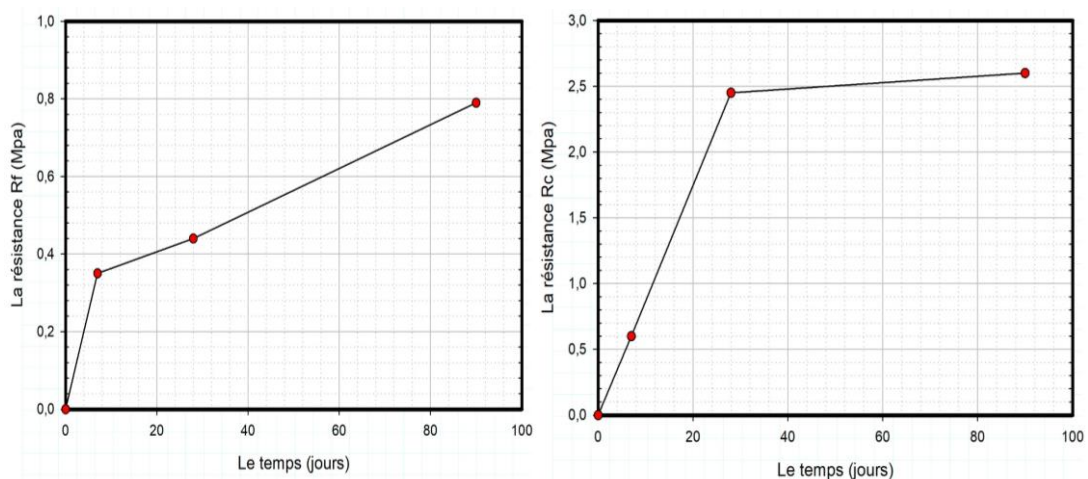


Fig. III. 2 Evolution de la résistance à la compression et à la traction en fonction du temps.

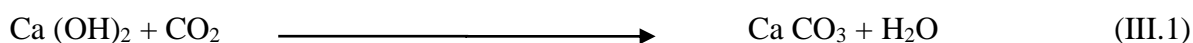
D'après les tableaux et les figures ci-dessus nous remarquons que :

Contrairement au béton traditionnel, le béton de sable à base de chaux se caractérise par son fort rapport " Eau/Chaux " sans l'utilisation de superplastifiant. Cela est dû à la consommation d'eau par la chaux et l'effet de finesse (granulométrie fine du mélange).

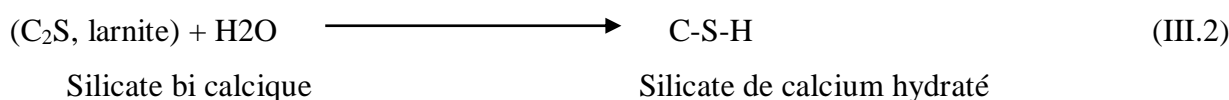
Pour le béton à base de chaux, on remarque qu'à 7 et 28 jours, la résistance à la compression est très faible. Cela est dû au pourcentage élevé de chaux hydratée.

La résistance à la compression et à la traction augmente avec le temps, surtout pour l'échéance entre 28 et 90 jours.

La résistance à la compression a atteint la valeur 2.45 MPa, soit une chute de résistance de plus de 90% par rapport au B S témoin (100% ciment). Cette chute est due au fait que la chaux réagit avec le dioxyde de carbone de l'air (CO₂) pour former les carbonates de calcium, par exemple (CaCO₃, MgCO₃) [2].



En présence d'eau, la réaction chimique entre les silicates calciques anhydres et H₂O, souvent partiellement hydraulique, se résume comme suit :



Pendant la mise en œuvre des mortiers, ces molécules forment essentiellement des silicates de calcium hydratés, dont les propriétés liantes sont importantes et stables. Dans les chaux, de par le mode et les températures de cuisson, la larnite (**Larnite** est un minéral de silicate de calcium de formule (Ca₂ SiO₄)) est souvent le seul silicate calcique impliqué dans l'hydratation, alors que pour les ciments Portland, d'autres silicates ont un rôle prépondérant (notamment le silicate tricalcique C₃S ou (alite)). Dans le même cadre de comparaison, les proportions d'alumine et, surtout de fer, sont souvent très faibles dans les calcaires à chaux. L'intervention des silico-aluminates ou des ferro-aluminates est ainsi le plus souvent négligeable [2].

Ce qui caractérise le béton de sable à base de ciment, par rapport au béton de sable à base de la chaux, est bien le volume important de liant qui est responsable du surcoût de la construction malgré l'utilisation limitée du béton de sable dans les constructions. De plus, ce type de béton avec des résistances élevées offre à la construction une durabilité meilleure à long terme et permet des économies de matériaux, mais n'oublions jamais que certaines utilisations nécessitent des valeurs minimales de résistances.

Ce résultat nous permet également de voir effectivement l'intérêt bénéfique de ce type de matériaux sur le plan économique, technique et écologique.

L'effet de la substitution totale du ciment par la chaux n'est malheureusement pas évident, car la chaux utilisée, qui vient de l'usine de Saida, présente un caractère hydraulique assez faible qui se traduit par l'insuffisance de la quantité de silice réactive. Ceci nous a conduit à la recherche d'autres techniques de formulations susceptibles d'améliorer les performances mécaniques du Béton de sable à base de chaux.

III.2.1.3 100% Plâtre

De la même manière que le béton à base de chaux, une étude sur le béton de sable à base de plâtre a été réalisée. Les résultats ainsi obtenus sont regroupés dans le tableau III.6 ci-dessous :

Tableau III.6 Résistance mécanique du béton de sable étudié (100% plâtre)

Echantillon	Rf en MPa à l'âge de			Rc en MPa à l'âge de		
	7j	28j	90j	7j	28j	90j
100% plâtre (E/P =0.85)	3.22	3.82	3.80	6.37	7.37	7.17

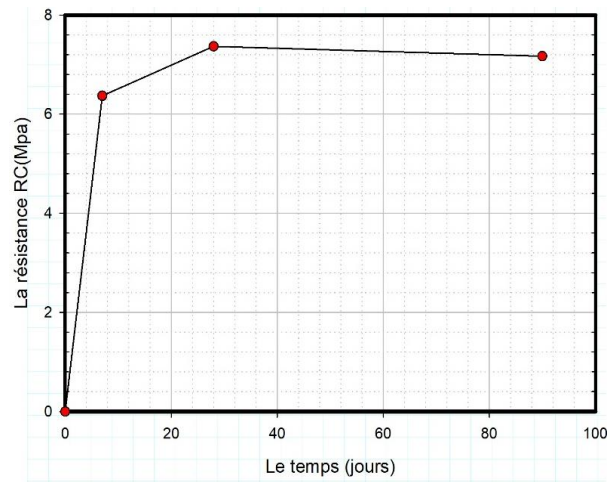
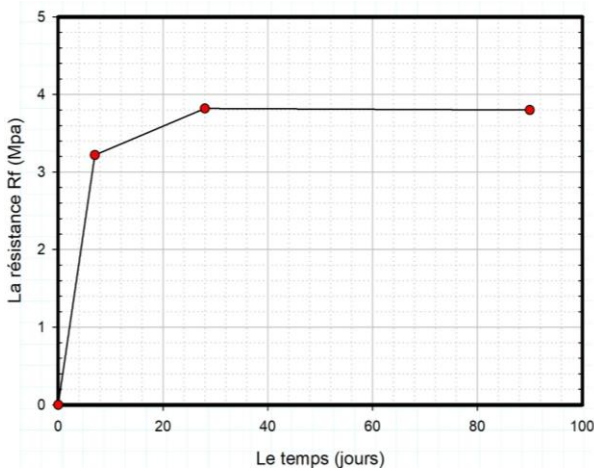


Fig. III.3 Evolution de la résistance à la compression et à la traction en fonction du temps.

Comme dans les cas précédents, l'objectif principal de cette partie est l'évaluation des caractéristiques mécaniques du béton de sable à base de plâtre.

La résistance à la compression et à la traction augmente considérablement avec le temps avant 28 jours et lentement entre 28 et 90 jours.

D’après les résultats obtenus, on peut constater que les résistances en flexion et en compression à différents âges sont généralement plus importantes que celles du béton à base de chaux, mais avec des faibles différences.

En effet, le but recherché par la substitution du ciment, par la chaux ou par le plâtre, est la recherche d’une formulation appropriée pour fabriquer des éléments de remplissage, moins chers que ceux fabriqués avec le ciment Portland et alors répondre à quelques besoins particuliers.

Les résultats de nos essais nous ont permis de conclure qu’avec une résistance de 7 MPa atteinte dans les 28 jours, il est possible d’élaborer un mortier comparable à la majorité des mortiers de construction (Mortier pour maçonnerie, mortier pour enduits, mortier de pose, mortier pour chapes, Mortier de jointoiement).

III.2.2 Etude d’un béton de sable à liant substitué

III.2.2.1 Cas 1 : 50% ciment

Dans ce cas, il faut que les proportions de tous les autres composants du BSAD (agrégat, filler, et eau) restent constantes. Notons que la substitution est toujours réalisée, en poids, sur la moitié du ciment (50%) par le ciment lui-même, la chaux et la pouzzolane.

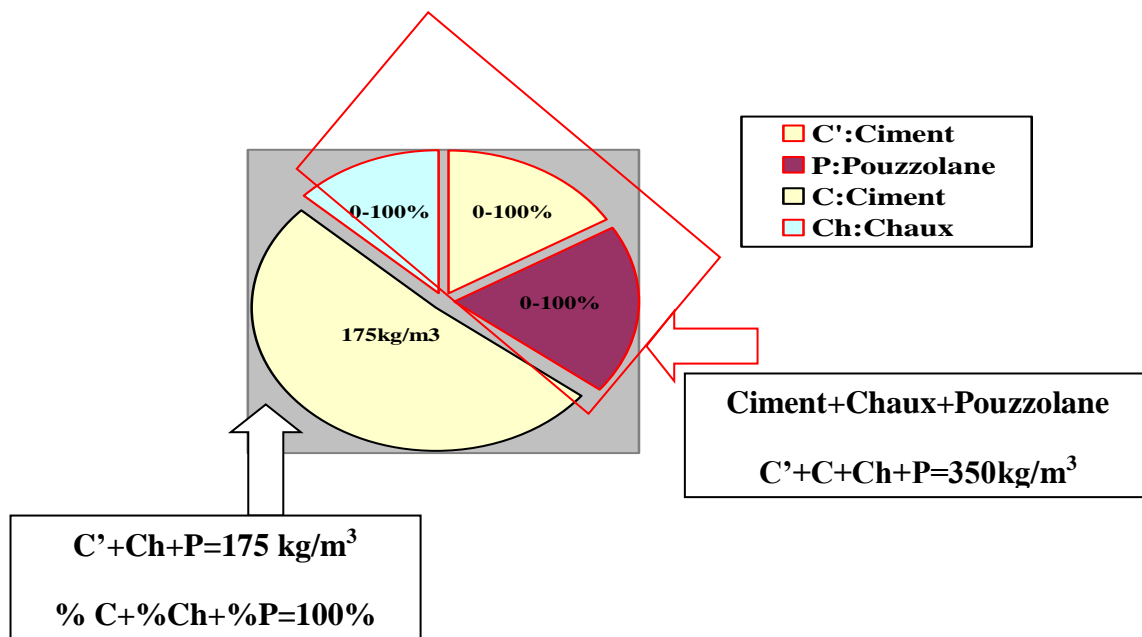


Fig. III. 4 Procédure de substitution du ciment.

L’application de la méthode des plans d’expériences, qui est basée sur une approche statistique, a permis de mieux comprendre l’effet des paramètres (ciment, chaux et pouzzolane (Un plan de mélange à 3 facteurs a été utilisé)) et d’établir des modèles mathématiques reliant l’effet des variations de ces paramètres sur la résistance mécanique à la compression et à la traction des BSAD.

La modélisation a été réalisée grâce à un logiciel d'analyse statistique JMP7. Ce logiciel favorise aussi des représentations graphiques qui illustrent de manière claire les résultats et améliore la compréhension des phénomènes étudiés.

III.2.2.1.1 Méthode des plans d'expériences

La première étape dans la préparation d'un plan d'expériences est la définition des objectifs de l'étude. Le but principal de la méthode basée sur les plans d'expériences est d'obtenir le maximum d'information en effectuant le minimum d'expériences tout en minimisant au maximum le nombre d'expériences à réaliser, et par conséquent avec un minimum de temps.

Pour ce travail les essais sont conçus selon la méthode des plans de mélanges. Les variables ou les facteurs d'étude des plans de mélanges (les liants) dans ce cas sont : le ciment, la chaux et la pouzzolane. Ce sont les proportions des constituants du mélange dont la somme des proportions est égale à 100% [3-10].

$$\sum x_i = 100 \quad \% \tag{III.3}$$

Le nombre de combinaisons est exprimé par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!} \tag{III.4}$$

Où :

- q : est le nombre de facteurs ;
- m : le nombre de niveaux.

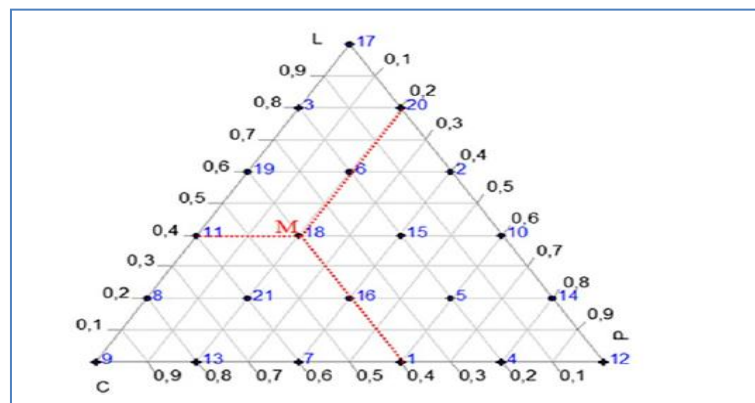


Fig. III. 5 Représentation triangulaire des 21 combinaisons étudiées à trois constituants.

Avec trois facteurs (q = 3) et cinq niveaux (m = 5), le nombre de combinaisons à traiter selon l'équation (III.4) est de 21. (tableau.7).

Tableau. III. 7 Les 21 essais donnés par la méthode des plans d'expériences

N° des essais	F1 = Ciment	F2 = Chaux	F3 = Pouzzolane
01	0.4	0.0	0.6
02	0.2	0.8	0.0
03	0.0	0.6	0.4
04	0.2	0.0	0.8
05	0.2	0.2	0.6
06	0.2	0.6	0.2
07	0.6	0.0	0.4
08	0.8	0.2	0.0
09	1.0	0.0	0.0
10	0.0	0.4	0.6
11	0.6	0.4	0.0
12	0.0	0.0	1.0
13	0.8	0.0	0.2
14	0.0	0.2	0.8
15	0.2	0.4	0.4
16	0.4	0.2	0.4
17	0.0	1.0	0.0
18	0.4	0.4	0.2
19	0.4	0.6	0.0
20	0.0	0.8	0.2
21	0.6	0.2	0.2

Tableau. III. 8 Contenu du ciment, de chaux et de pouzzolane dans le liant

N° des essais	Liant total (kg/m ³)	Partie fixe de ciment (kg / m ³)	Matériaux substitués		
	C+C'		C'	F1= Ciments	F2= Chaux
SC01	350	175	070	0	105
SC02			035	140	000
SC03			000	105	070
SC04			035	000	140
SC05			035	035	105
SC06			035	105	035
SC07			105	000	070
SC08			140	035	000
SC09			175	000	000
SC10			000	070	105
SC11			105	070	000
SC12			000	000	175
SC13			140	000	035
SC14			000	035	140
SC15			035	070	070
SC16			070	035	070
SC17			000	175	000
SC18			070	070	035
SC19			070	105	000
SC20			000	140	035
SC21			105	035	035

III.2.2.1.1.1 Détermination des effets des facteurs

Une fois que les variables et les réponses ont été définies et introduites dans le logiciel JMP 10.0, celui-ci a suggéré l'étude expérimentale des 21 compositions, où les paramètres C, L et P sont les variables. On a fait varier entre des limites préalablement fixées (tableau III. 7 et tableau III. 8). Ces compositions ont été expérimentalement étudiées. Pour chacune de ces compositions, les propriétés mécaniques ont été déterminées à deux âges différents : Rf et Rc à 7 et 28 jours (Rf7j, Rc7j, Rf28j, Rc28j). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 9.

Tableau. III. 9 Résultats des tests de la caractérisation mécanique

N ° de l'échantillon	Rf en MPa		Rc en MPa	
	7j	28j	7j	28j
SC01	1.54	2.08	12.79	16.64
SC02	0.92	1.47	12.36	10.48
SC03	1.07	1.57	08.33	15.06
SC04	1.29	1.70	09.33	17.70
SC05	1.16	2.00	14.47	20.50
SC06	1.38	1.94	12.33	13.72
SC07	1.90	2.60	22.72	30.15
SC08	2.22	2.96	25.94	32.07
SC09	2.89	3.60	29.13	36.23
SC10	1.53	1.91	11.06	23.73
SC11	2.25	3.00	23.02	24.23
SC12	0.90	1.97	07.84	20.15
SC13	2.16	2.77	20.54	30.59
SC14	1.06	1.81	08.15	17.79
SC15	1.21	1.50	09.07	16.36
SC16	1.46	2.31	13.96	21.98
SC17	0.66	1.21	06.65	07.22
SC18	1.37	1.98	14.72	19.55
SC19	1.35	1.81	14.59	16.86
SC20	0.67	1.35	08.64	11.43
SC21	1.52	2.22	18.55	23.98

III.2.2.1.1.2 Création des modèles

En utilisant la méthode des plans de mélanges à l'aide du logiciel JMP, il est possible d'obtenir un modèle mathématique décrivant l'influence des trois proportions des matériaux de substitution (C, Ch et P) et de leurs interactions binaires (C * Ch, Ch * P et C * P) sur la résistance mécanique du béton de sable. Celui-ci est un modèle du second degré avec trois variables non indépendantes et cinq niveaux.

$$y = a_1C + a_2Ch + a_3P + a_{12} CxCh + a_{23} ChxP + a_{13} CxP \quad (III.5)$$

Où y est la réponse à modéliser, P, Ch et C sont les variables indépendantes (facteurs a_i et a_{ij} sont les coefficients du modèle). Les coefficients du modèle (a_i/a_{ij}) représentent la contribution des variables associées à la réponse y (Rc et Rf). Tous les coefficients des modèles mathématiques ont été trouvés par une méthode de régression basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés [3-10]. Nous présentons ci-dessous les résultats des modélisations effectuées :

La majorité des modèles adaptés ont présenté des coefficients de corrélation relativement élevés. Ceci montre la bonne corrélation existant entre les réponses obtenues par les simulations et les valeurs prédites par le modèle ainsi trouvé. Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R^2) et les probabilités p-value des réponses sont regroupés dans le tableau III. 10.

Tableau III. 10 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées

Résistance	R ²		Coefficients	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Rf7j	R ² =0.90	C	02.82	0.165931	17.03	<0.0001*
		P	01.03	0.165931	06.22	<0.0021*
		Ch	00.58	0.165931	03.52	0.0031*
		C*P	-01.43	0.691379	-02.07	0.0561
		Ch* P	03.59	0.691379	01.93	0.0721
		C*Ch	-00.31	0.691379	-00.46	0.6532
Rt28j	R ² =0.90	C	03.59	0.176437	20.36	<0.0001*
		P	01.92	0.176437	10.89	0.0027*
		Ch	01.13	0.176437	06.41	0.3644
		C*P	-02.26	0.735153	-03.08	0.0341*
		Ch* P	00.62	0.735153	00.85	0.3272
		C*Ch	-00.32	0.735153	-00.44	0.7094
RC7j	R ² =0.92	C	29.36	1.697032	17.30	<0.0001*
		P	07.97	1.697032	04.70	0.0003*
		Ch	06.90	1.697032	04.07	0.0010*
		C*P	-11.41	7.070965	-01.61	0.1272
		Ch* P	06.50	7.070965	00.92	0.3719
		C*Ch	00.98	7.070965	00.14	0.8915
RC28j	R ² =0.93	C	38.00	1.789734	21.24	<0.0001*
		P	18.50	1.789734	10.34	<0.0001*
		Ch	06.34	1.789734	03.55	0.0029*
		C*P	-19.99	7.457227	-02.68	0.0171*
		Ch* P	14.05	7.457227	01.89	0.0789
		C*Ch	-07.34	7.457227	-00.99	0.3401

$$Rf7 = 2.825C + 0.584Ch + 1.031P - 0.317C*Ch - 1.432C*P + 3.59 Ch*P \quad (III.6)$$

$$Rf28 = 3.592C + 1.131 Ch + 1.921P - 0.326C*Ch - 2.263C*P + 0.625 Ch *P \quad (III.7)$$

$$Rc7 = 29.365C + 6.903 Ch + 7.973P + 0.981C*Ch - 11.419C*P + 6.509 Ch *P \quad (III.8)$$

$$Rc28 = 38.006C + 6.345 Ch + 18.509P - 7.348C*Ch - 19.996C*P + 14.058 Ch*P \quad (III.9)$$

Il convient de noter que :

Les facteurs C, Ch et P doivent être introduites dans les équations III.6 à III.9 en tant que valeurs de proportion de 0 à 1, avec une somme égale à 1, comme indiqué dans le tableau III.7.

Les coefficients de signe négatif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable associée fait diminuer la réponse, les coefficients de signe positif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable fait augmenter la réponse.

Sur la base de cette analyse statistique, et après l'élimination de termes non significatifs, les modèles donnés par les équations III.6-III.9 peuvent être réduits comme indiqué dans les équations III.10-III.13 tout en gardant de bons coefficients de corrélation. Dans cette étude, la probabilité d'acceptation pour les coefficients est fixée à une valeur p inférieure à 0,007 (tableau III .10). En ne conservant que les termes importants, les équations III.6-III.9 deviennent comme montré dans les équations III.10-III.13 :

$$Rf 7 = 2.825C + 0.584Ch + 1.031P \quad (III.10)$$

$$Rf28 = 3.592C + 1.131 Ch + 1.921P - 2.263 C*P \quad (III.11)$$

$$Rc7 = 29.365C + 6.903 Ch + 7.973P \quad (III.12)$$

$$Rc28 = 38.006C + 6.345 Ch + 18.509P \quad (III.13)$$

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues (Figures III.10et III.11) nous permet de s'assurer qu'il ne reste pas d'informations à extraire de nos résultats. En d'autre terme, les graphiques des résidus donnent une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En effet, d'après la figure III. 10 et la figure III. 11 , il semble que les résidus sont répartis au hasard (pas de tendance particulière). Donc, on peut dire que les modèles issus de l'application de la méthode de plan d'expériences expliquent bien les résultats expérimentaux.

III.2.2.1.1.3 Validité des modèles mathématiques

La vérification de la validité des modèles proposés basé sur le calcul des erreurs (erreur expérimentale et erreur ajustement) et sur l'évolution de l'incertitude de aux coefficients de ce modèle. Les Figures III. 6 et III. 7 présentent 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 [3].

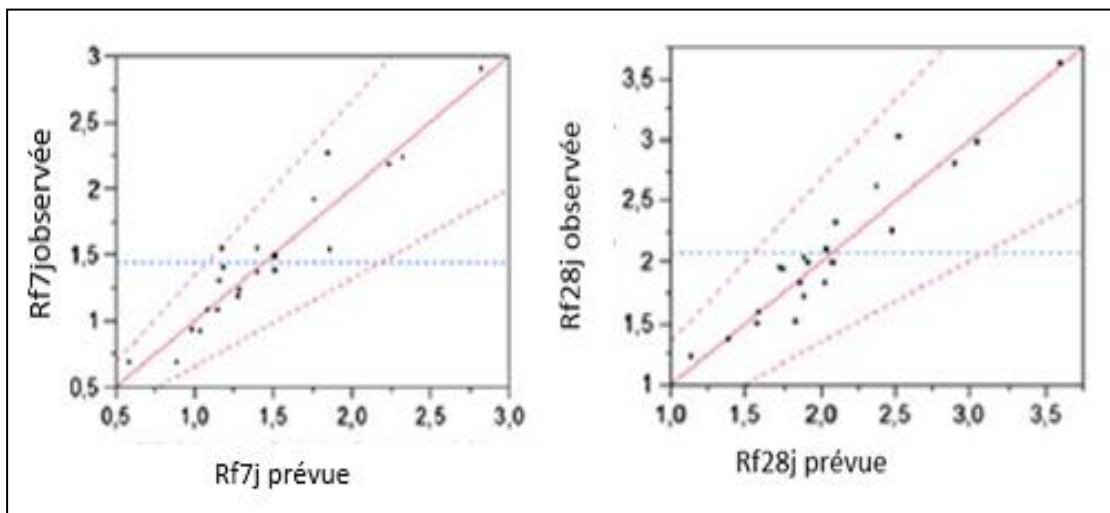


Fig. III. 6 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses : Rf 7j, 28j.

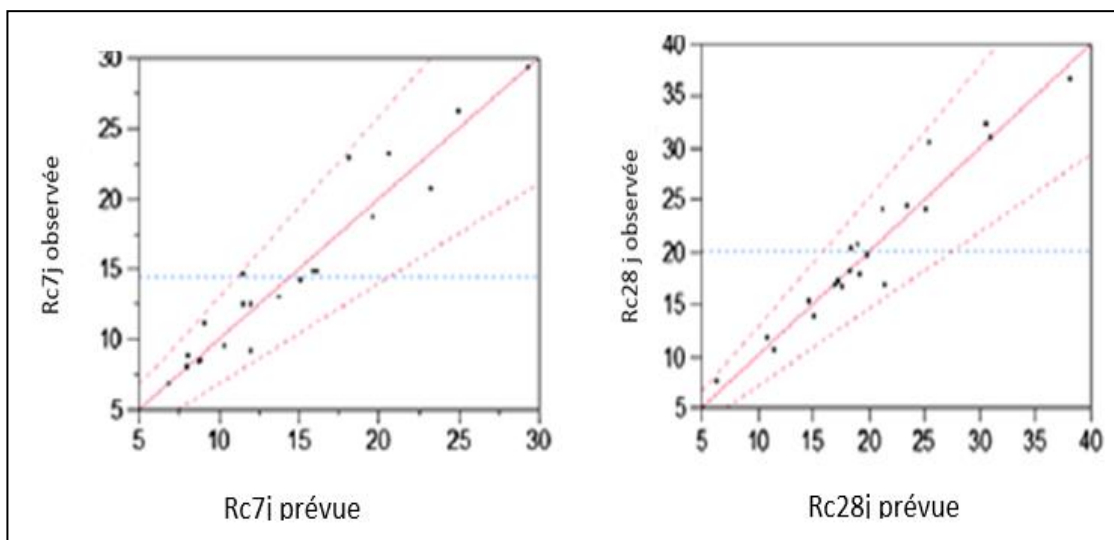


Fig. III. 7 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses : RC7j et 28j.

Sur la base des compositions sélectionnées (tableau.III.7), les réponses mesurées ont été introduites dans le logiciel JMP qui a conduit aux modèles requis. Toutes les réponses (Rf7j, Rf28j, Rc7j et Rc28j) en fonction des variables étudiées (C, Ch et P) peuvent être écrites comme indiqué dans les équations III.6-III.9. Ces dernières peuvent être facilement utilisées pour calculer les propriétés mécaniques du composite en fixant les variables C, Ch et P et pour tracer tous les graphiques nécessaires. Les diagrammes ternaires correspondants sont représentés sur les figures III. 8 et III. 9 .

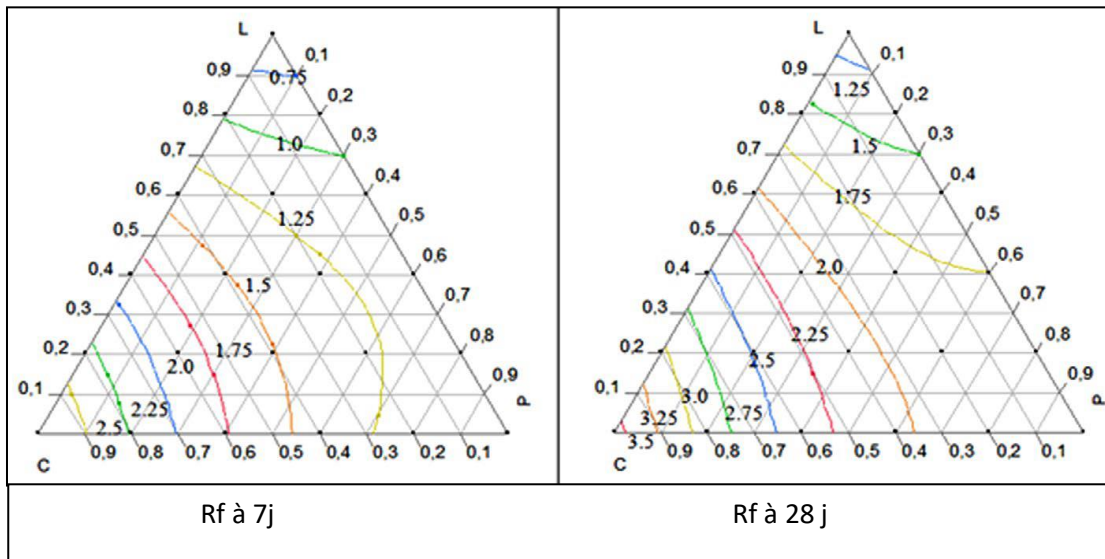


Fig. III. 8 Diagramme ternaire de Rf (MPa) en fonction des proportions C, Ch et P.

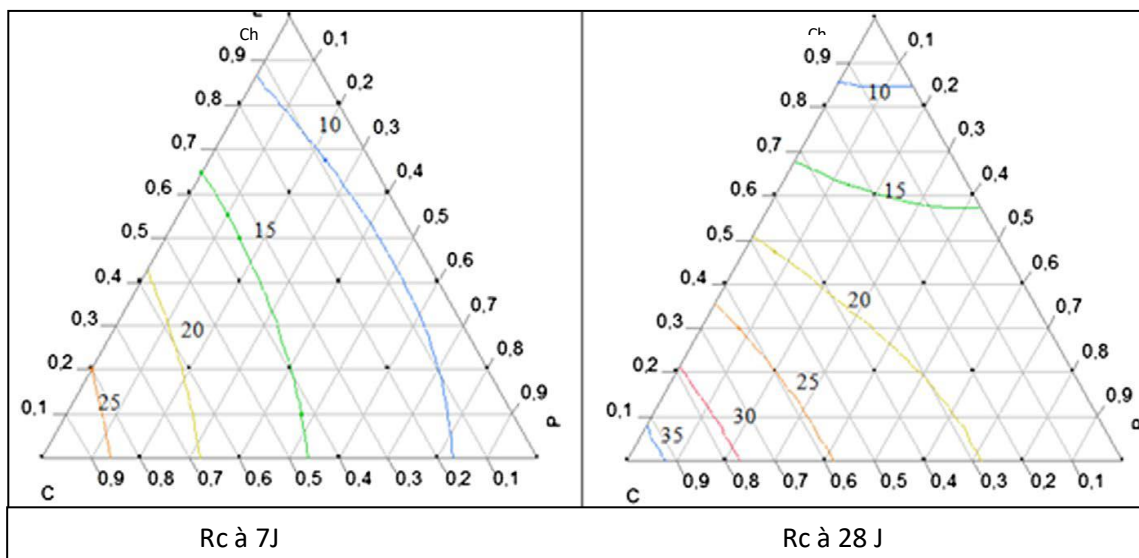


Fig. III. 9 Diagramme ternaire de R c (MPa) en fonction des proportions C, L (Ch) et P.

Le béton de sable SC09 (100% C) a présenté les meilleures résistances, en compression et en flexion. Par contre les autres bétons de sable présentent des résistances plus faibles. Le SC08 (80% C + 20% Ch) occupe le deuxième rang avec une résistance à la compression inférieure d'environ 11,48%, mais avec une économie de 20% de ciment. Même pour SC13 (80% C + 20% P), qui occupe le troisième rang en termes de résistance mécanique, il y avait une plus faible résistance mécanique d'environ 15,57% par rapport à SC09 (100% C), mais avec une économie de ciment de 20%. Les valeurs minimales sont enregistrées dans le cas de SC17 (100% Ch), en compression et en flexion. Un taux élevé de chaux a engendré une influence négative sur la résistance mécanique, mais il ne faut pas oublier que certaines utilisations peuvent exiger des niveaux de résistance mécanique inférieurs, ce qui est bon en termes d'économie. En comparant SC17 (100% Ch) et SC12 (100% P), il semble que la pouzzolane est la plus avantageuse pour la résistance mécanique. En outre, les courbes iso-réponses donnent les diagrammes ternaires, comme illustré dans les figures III.8 et III.9 et peuvent donner une idée sur l'évolution de la résistance mécanique au jeune âge et à 28 jours en fonction de chacun des paramètres C, Ch et P proportions. Selon ces schémas, les combinaisons des effets de C, Ch et P peuvent conduire aux observations suivantes :

- (1) Pour un dosage constant de ciment (C), l'augmentation de Ch avec la diminution de P ne varie pas trop la résistance mécanique du béton de sable, à l'exception des cas pour $C < 30\%$, où une diminution de R_{c28j} a été notée.
- (2) Pour un dosage constant de pouzzolane (P), l'augmentation de C avec la diminution de ch augmente la résistance mécanique. En d'autres termes, l'augmentation de la chaux dans le béton de ciment diminue sa résistance mécanique. De même, Arandigoyen et al. [11] ont noté que, si une certaine quantité de ciment est ajoutée (0-40%) aux mortiers de chaux, leur résistance mécanique augmente légèrement ; tandis que si une certaine quantité de chaux est ajoutée aux mortiers de ciment, leur résistance mécanique diminue considérablement. En outre, Metwally et al. [12] ont également étudié l'effet de la chaux sur les propriétés de ciment mixte et l'utilisation de l'eau de chaux comme une solution de mélange, et ont constaté le développement de la résistance à jeune âge. Certes, les matériaux de construction à base de chaux sont souvent censés comme notoirement faibles et lents à établir et ne peuvent pas rivaliser avec de ciment Portland, mais, Grist et al. [13] ont démontré que les mortiers de chaux-pouzzolane préparés au laboratoire en utilisant les ajouts pouzzolaniques modernes peuvent atteindre des résistances à la compression à 28 jours de plus de $25,0 \text{ N/mm}^2$.
- (3) Pour un dosage constant de chaux (Ch), l'augmentation de C avec la diminution de P augmente aussi la résistance mécanique. En effet, les pouzzolanes peuvent souvent être moins chères que le ciment Portland qu'ils remplacent, mais leur principal avantage réside dans

l'hydratation lente et donc un faible de dégagement de chaleur. Le remplacement partiel de ciment Portland par la pouzzolane réduit la compacité du ciment et réduit donc sa résistance mécanique [14]. En outre, l'analyse des résultats par le logiciel JMP a conduit à la mise en place des graphiques montrant, avec une bonne corrélation $R^2 = 0.90$ à 0.93 , les valeurs observées de la résistance en fonction des valeurs prédites (figures III. 10 et III. 11).

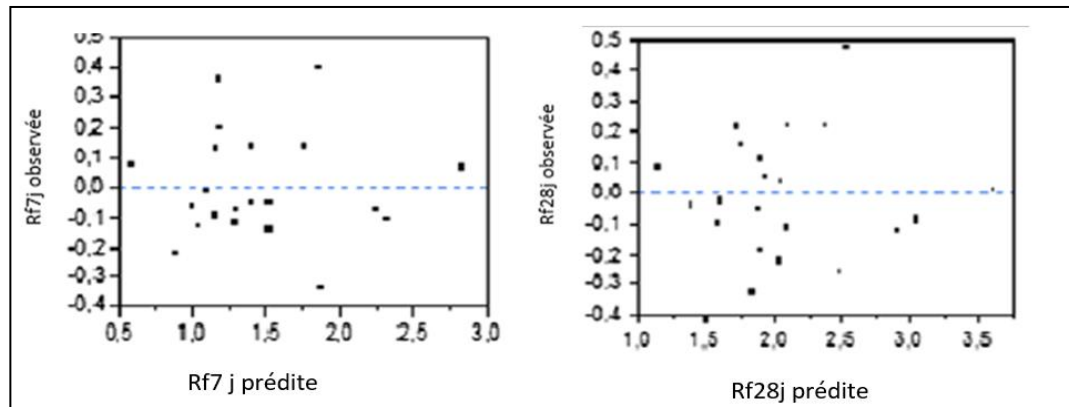


Fig. III. 10 Résidus en fonction des valeurs prédites de la résistance mécanique.

Les figures III. 10 et III. 11 donnent également le schéma des résidus en fonction des valeurs prédites de la résistance mécanique. L'analyse de ces chiffres montre que les résidus sont dispersés au hasard, c.à.d. ils ne montrent pas de tendance particulière. On peut en conclure que le modèle postulé représente correctement les réponses étudiées du béton de sable à base de C, Ch et P.

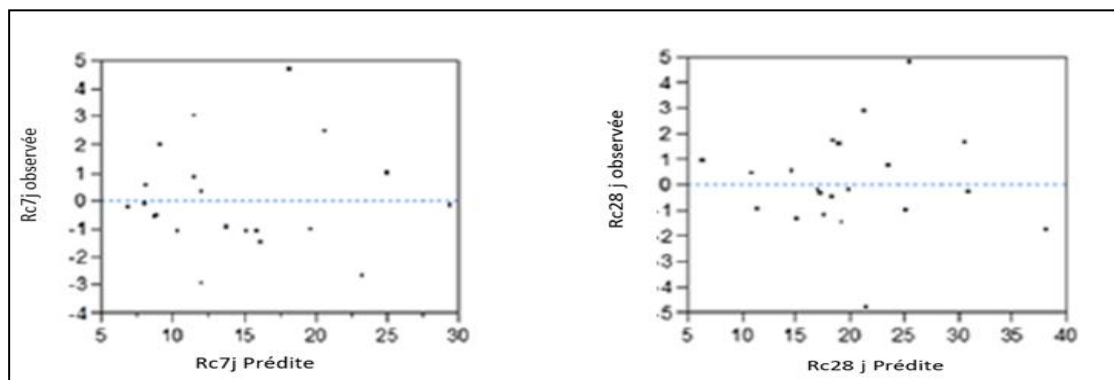


Fig. III. 11 Résidus en fonction des valeurs prédites de la résistance mécanique.

III.2.2.2 Cas 2 : 50% Chaux

Dans ce cas, la substitution est aussi réalisée en poids sur la moitié de la chaux (50%) par le plâtre, la chaux et la pouzzolane. Cependant, les proportions de tous les autres composants du BSAD (agrégat, filler, et eau) restent constantes.

Dans ce cas on a substitué totalement le ciment par la chaux.

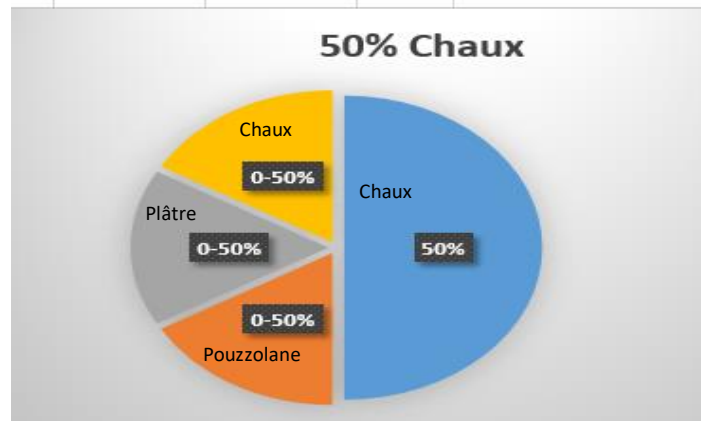


Fig. III.12. Procédure de substitution de la chaux

Tableau III. 11 Proportions des facteurs dans les compositions étudiées

N° des essais	E/L	Liant total (kg / m ³)	Partie fixe de chaux (kg / m ³)	Matériaux substitués (kg / m ³)		
				Ch+Ch'	Ch'	F1= plâtre
SC01	0.96	350	175	000	000	175
SC02				000	035	140
SC03				000	070	105
SC04				000	105	070
SC05				000	140	035
SC06				000	175	000
SC07				035	000	140
SC08				035	035	105
SC09				035	070	070
SC10				035	105	035
SC11				035	140	000
SC12				070	000	105
SC13				070	035	070
SC14				070	070	035
SC15				070	105	000
SC16				105	000	070
SC17				105	035	035
SC18				105	070	000
SC19				140	000	035
SC20				140	035	000
SC21				175	000	000

Tableau III. 12 Résultats des tests de caractérisation mécaniques.

N ° de l'échantillon (P,Ch,Pz)	Rf en MPa			Rc en MPa		
	7j	28j	90j	7j	28j	90j
SC01	0.063	0.093	0.16	0.50	1.50	2.71
SC 02	0.063	0.094	0.21	0.54	1.78	2.82
SC 03	0.07	0.025	0.37	0.56	2.00	3.45
SC 04	0.078	0.33	0.345	0.55	2.05	3.52
SC 05	0.079	0.30	0.34	0.58	1.99	2.80
SC 06	0.35	0.44	0.79	0.60	2.45	2.60
SC 07	0.37	0.51	0.52	0.86	2.48	3.50
SC 08	0.44	0.56	0.60	0.88	3.08	4.63
SC 09	0.49	0.58	0.66	0.95	3.24	4.625
SC 10	0.49	0.61	0.70	0.95	3.10	4.48
SC 11	0.50	0.60	0.68	0.98	2.80	2.98
SC 12	0.50	0.66	0.70	0.98	2.90	3.60
SC 13	0.52	0.67	0.77	0.99	2.99	4.04
SC 14	0.53	0.67	0.78	0.89	2.60	3.63
SC 15	0.53	0.68	0.76	0.91	2.44	2.50
SC 16	0.53	0.77	0.89	1.75	2.96	3.97
SC 17	0.65	0.78	0.89	1.60	2.90	3.68
SC 18	0.65	0.79	0.88	1.62	2.80	3.00
SC 19	1.51	1.61	1.68	2.00	4.05	4.49
SC 20	1.51	1.60	1.67	1.98	4.00	4.09
SC 21	1.52	1.78	2.12	2.12	5.07	5.567

Dans ce cas les réponses souhaitées sont aussi : la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

Les résultats des réponses obtenus sont ensuite injectés dans le logiciel "JMP7". Ils sont représentés par des diagrammes ternaires reliant les constituants de la matrice, à savoir la chaux, le plâtre, la pouzzolane et les fillers calcaires.

Rappelons que la composition de base du béton est maintenue constante pendant tous les essais, sauf pour ce cas et les cas suivants où les compositions sont réalisées sans utilisation d'adjuvant.

Les compositions obtenues sont résumées dans le tableau III.11 selon leurs ordres de préparations dans le laboratoire.

III.2.2.2.1 Exploitation des résultats du plan de mélange

Les résultats des 21 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois facteurs (Ch, P , Pz) peuvent bien exploiter les 21 compositions par l'élaboration des modèles mathématiques décrivant l'effet de type d'ajout sur les propriétés des BDS. Ces modèles ont facilité , la visualisation de l'effet de chaque ajout séparément et en combinaison avec d'autre types d'ajout sur les propriétés des BDS, par des diagrammes ternaires avec des courbes iso-réponses. Les résultats obtenus lors des essais sont regroupés dans le tableau III. 12.

III.2.2.2.2 Modèles mathématiques

$$Y = a_1 P + a_2 Ch + a_3 Pz + a_{12} P * Ch + a_{23} Ch * Pz + a_{13} P * Pz \quad (III.13)$$

Les coefficients issus du modèle, les coefficients de corrélation (R^2), les rapports-t et les probabilités p-value des réponses sont regroupés dans le tableau III.13.

Tableau III. 13 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées

Résistance	R ²		Coefficients	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Rt7j	R ² =0.88	P	1.64	0.14716409	11.20	0.0001*
		Ch	0.30	0.14716409	02.07	0.0558
		PZ	0.10	0.14716409	00.71	0.4868
		P* Ch	-0.99	0.61318369	-01.61	0.1269
		P* Pz	-0.84	0.61318369	-01.36	0.1937
		Ch *Pz	-0.29	0.61318369	-00.47	0.6391
Rt28j	R ² =0.91	P	1.83	0.12904185	14.24	<0.0001*
		Ch	0.46	0.12904185	03.59	0.0027*
		Pz	0.12	0.12904185	00.93	0.3644
		P* Ch	-1.25	0.53767437	-02.33	0.0341*
		P* Pz	-0.54	0.53767437	-01.01	0.3272
		Ch *Pz	-0.20	0.53767437	-00.37	0.7094
Rt90j	R ² =0.94	P	2.11	0.11381891	18.55	<0.0001*
		Ch	0.68	0.11381891	06.03	<0.0001*
		Pz	0.21	0.11381891	01.89	0.0776
		P* Ch	-1.96	0.47424547	-04.15	0.0009*
		P* Pz	-1.04	0.47424547	-02.19	0.04406*
		Ch *Pz	-0.25	0.47424547	-00.54	0.5931
RC7j	R ² =0.94	P	2.29	0.12443382	18.45	<0.0001*
		Ch	0.62	0.12443382	04.99	0.0002*
		Pz	0.49	0.12443382	03.97	0.0012*
		P* Ch	-0.65	0.51847425	-01.25	0.2269
		P* Pz	-0.14	0.51847425	-00.27	0.78666
		Ch *Pz	0.01	0.51847425	00.02	0.98423
RC28j	R ² =0.80	P	4.70	0.34204323	13.74	<0.0001*
		Ch	2.39	0.34204323	06.99	<0.0001*
		Pz	1.64	0.34204323	04.80	0.0002*
		P* Ch	-2.58	1.42518013	-01.81	0.0892
		P* Pz	0.04	1.42518013	00.02	0.9778
		Ch *Pz	-0.41	1.49403426	-00.27	0.7876
RC90j	R ² =0.63	P	4.96	0.45459223	10.91	<0.0001*
		Ch	2.53	0.45459223	05.56	<0.0001*
		Pz	2.57	0.45459223	05.66	<0.0001*
		P* Ch	-2.27	1.8941343	-01.20	0.2487
		P* Pz	1.46	1.8941343	00.77	0.4517
		Ch *Pz	5.23	1.8941343	02.76	0.0144*

D'après ce tableau, les modèles retenus des réponses Rf7j, ...Rc90j s'écrivent comme un polynôme de second degré.

R² permet d'évaluer la capacité d'un modèle mathématique de retrouver des valeurs proches de celles mesurées. Donc R² donne une idée sur la qualité du modèle postulé. Généralement, on dit qu'un modèle mathématique est de bonne qualité lorsque son R² est proche de 1.

D'après ces résultats, on remarque que les coefficients de corrélations des modèles postulés sont généralement forts et proches de 1. On peut dire que nos modèles sont bons, sauf dans le cas de RC90j (R²=0.63). Dans ce cas-là, il est possible d'augmenter sa valeur jusqu'à 0.90 en introduisant le croisement des trois facteurs P*Pz*Ch dans les calculs du modèle, ou bien par l'utilisation des modèles de degré supérieur ; mais, dans notre cas, on a gardé la première valeur du coefficient de corrélation pour rester dans les mêmes conditions des autres compositions et par conséquent avoir une comparaison de résultats fiables.

A partir du modèle dérivé de résistance à la compression et à la flexion à 7, 28 et à 90 jours, on constate que la résistance à la flexion à l'âge de 7j et 28j est conditionnée d'abord par l'effet de la teneur en plâtre, pouzzolane et la chaux et à l'âge de 90j ; la flexion est conditionnée d'abord par l'accroissement de la teneur en plâtre, pouzzolane et la chaux, suivie par l'effet couplé du plâtre et de la pouzzolane. Par contre la résistance à la compression est conditionnée par l'accroissement de la teneur en plâtre et la chaux et la pouzzolane à l'âge de 7j, 28j et à l'âge de 90j.

On remarque aussi que les résistances mécaniques se développent dans les premiers 28 jours de l'hydratation et elles sont plus faibles pour tous les bétons de sable étudiés. En effet, la résistance à la compression du béton de sable témoin à 100% chaux (SC06) est très faible, cela est due au pourcentage élevé de chaux hydratée ; elle atteint à 7 jours plus de 23% de sa résistance et à 28j elle atteint plus de 90 % de sa résistance à la compression à 90 jours. On remarque aussi que la résistance mécanique se développe de manière très lente après 28 jours avec une augmentation de résistance d'environ 5%.

Les résistances à la compression et à la traction, augmentent avec le temps, surtout pour l'échéance entre 28 et 90 jours. L'augmentation de la résistance au-delà de 28 jours est due à la réaction pouzzolanique très lente, entre la pouzzolane et la chaux.

Les dosages des deux facteurs présentent des valeurs optimales de 50% de chaux et 50% de plâtre (SC21) pour lesquelles la résistance à la compression atteint une valeur maximale (la meilleure résistance) avec une augmentation de résistance d'environ 53% par rapport à SC06 (100% Ch).

Même pour SC09 (20% P + 40% Ch+ 40% Pz), SC08 (20% P + 20% Ch + 60% Pz), SC10 (20% P + 60% Ch + 20% Pz), SC13 (40% P + 20% Ch + 40% Pz), SC19 (80% P + 00% Ch + 20% Pz),

SC20 (80% P + 20% Ch + 00% Pz) qui occupent le deuxième rang en termes de résistance mécanique, il y avait une faible résistance mécanique d'environ 22% par rapport à SC21 (50% de chaux et 50% de plâtre), mais avec une augmentation d'environ 30% par rapport au béton de sable témoin (à 100% chaux : SC 06).

Même pour : SC18 (60 % P + 40% Ch + 00% Pz), SC17 (60% P + 20% Ch + 20% Pz), SC16 (60% P + 00% Ch + 40% Pz), SC14 (40% P + 40% Ch + 60% Pz), SC12 (40% P + 00% Ch + 60% Pz), SC07 (20% P + 00% Ch + 80% Pz), SC04 (00% P + 60% Ch + 40% Pz), SC03 (00% P + 40% Ch + 60% Pz), qui occupent le troisième rang en termes de résistance mécanique, il y avait une résistance mécanique plus faible d'environ 37 % par rapport à SC21 (50% de chaux et 50% de plâtre) mais avec une augmentation de 16% par rapport à SC06 (100% Ch).

En effet, un taux élevé de chaux a engendré une influence négative sur la résistance mécanique. En comparant SC06 (100% Ch) et SC01 (100% Pz) c'est-à-dire 50% Pouzzolane, il semble que la pouzzolane est la plus avantageuse pour la résistance mécanique.

En outre, les courbes iso-réponses donnent les diagrammes ternaires, comme illustré dans les Figures III.13. Ces courbes peuvent donner une idée sur l'évolution de la résistance mécanique au jeune âge et à 90 jours en fonction de chacun des facteurs P, Ch et Pz. Selon ces courbes, la combinaison des effets de P, Ch et Pz peuvent conduire aux conclusions suivantes :

Pour un dosage constant de plâtre P, l'augmentation de la pouzzolane Pz avec la diminution de la chaux (Ch) augmente la résistance mécanique. En d'autres termes, l'augmentation de la chaux dans les bétons étudiés diminue leurs résistances mécaniques. De même, Said et al. [15] ont noté qu'une certaine quantité de pouzzolane dans les mortiers de chaux, permet d'augmenter légèrement leurs résistances mécaniques et ont conclu que le pourcentage idéal d'un liant (pouzzolane – chaux) est de (75% pouzzolane + 25% chaux), ce qui aboutit à une résistance à 28j de 4 MPa. En outre, Walker et al.[16] ont également étudié l'influence de certaines propriétés physiques des pouzzolanes, y compris la taille des particules et la surface spécifique, la composition chimique et minérale, l'amorphisme (Absence de forme déterminée et de structure) et la demande en eau, sur la réactivité de la pouzzolane et comment ces propriétés affectent la demande en eau et les performances mécaniques des pâtes de chaux-pouzzolane. Les résultats obtenus ont montré que les produits d'hydratation des pâtes de chaux / pouzzolane sont similaires à ceux des mortiers et des ciments hydrauliques à la chaux, bien que leur formation soit considérablement plus lente que dans les pâtes de ciment. D'après les résultats de la présente étude, on remarque une augmentation de la résistance du béton SC06 (100% Ch) avec le temps, mais son évolution est très lente, ce qui a été également montré par Mosleh [17].

Dans son étude, il a étudié l'évolution des résistances à la compression à l'âge de 07, 28 et 56 jours d'un béton à base de chaux avec des agrégats. Les résultats de cette étude montrent que tous les bétons présentent une augmentation de résistances avec le temps qui dépasse 4MPa à l'âge de 28 jours, mais le temps de durcissement est très lent ; l'ajout de la quantité de ciment dans ce type de béton augmente la vitesse de durcissement.

Selon les résultats des données expérimentales, l'introduction simultanée du plâtre et de la pouzzolane dans le béton à base de chaux conduit à un nouveau liant à base de plâtre très intéressant qui donne des résultats remarquables, surtout concernant la résistance en comparaison avec le béton sans plâtre. Deux études ont été réalisées par Rémillon en 1962 concernant un béton en plâtre à base de graviers de grès et un autre à base de graviers de gypse[18]. Les résultats de ces études montrent que les agrégats de gypse présentent une meilleure résistance à la compression (10 MPa), une meilleure résistance à la traction par flexion (1,3 MPa), bien qu'ici l'ajout de plâtre comme liant est non seulement pour améliorer les propriétés mécaniques, mais aussi les propriétés acoustiques. Dans les travaux de Čáchová1 et al. [19], de nouveaux types de mortiers ont également été présentés où l'amélioration a été atteinte par l'utilisation de perlite. (La perlite est un matériau qui a l'aspect de granulés ou de poudre, de couleur blanche, c'est un sable siliceux d'origine volcanique contenant de l'eau qui est expansé industriellement par un traitement à la chaleur (1200 °C). Elle est composée de silice, d'alumine, d'oxyde de fer, d'oxyde de titane, de chaux, de magnésie, d'oxyde de sodium et de potassium. Elle a une très grande capacité de rétention d'eau (4 à 5 fois son poids) légèrement expansée à porosité élevée. Le deuxième agrégat utilisé était du sable de silice. En ce qui concerne le liant, trois types de matériaux ont été combinés pour la raison d'une meilleure performance du mortier : la chaux pure, le ciment Portland et de la poudre de céramique pouzzolanique. L'utilisation des déchets de pouzzolane présentait un effet positif, non seulement du point de vue des performances mécaniques, mais aussi des aspects écologiques (diminution de la consommation de liant primaire ainsi que le traitement des déchets). Autre type de liant était le ciment Portland, où la dose est prise en plus faible quantité. Les deux mortiers ont montré une densité apparente faible. En ce qui concerne la porosité ouverte, les valeurs ainsi obtenues se rapprochent largement des valeurs supérieures souhaitées. Plus précisément, quand juste la perlite expansée était utilisée, la porosité ouverte dépassait 60%. Cela a conduit à l'amélioration de l'isolation thermique des mortiers. La conductivité thermique était inférieure à 0,16 Wm-1K-1 dans le cas d'agrégats combinés et même de 27% plus bas quand juste la perlite a été utilisée. Rappelons que Rachedi et al. [20] ont étudié la conductivité thermique du plâtre de chaux-pouzzolane. Les résultats de cette étude ont permis de constater que la présence de la pouzzolane avec adjuvant a augmenté la résistance à la compression des bétons.

La valorisation de la pouzzolane et la chaux peut donc être bénéfique tant dans le cadre économique, que dans le cadre environnemental. L'ajout de ces deux matériaux donne des avantages et améliore les caractéristiques mécaniques des bétons.

L'ajout de pouzzolane a comme avantages, des coûts moindres et une meilleure durabilité ; et comme inconvénient, des temps de solidification plus longs ainsi qu'un développement de la résistance initiale plus lente. Alors la réaction entre la pouzzolane et la chaux est très lente. Pour activer cette réaction, il apparaît nécessaire d'utiliser des activateurs de durcissement. Le ciment semble le meilleur activant comme nous l'avons vue dans le premier cas.

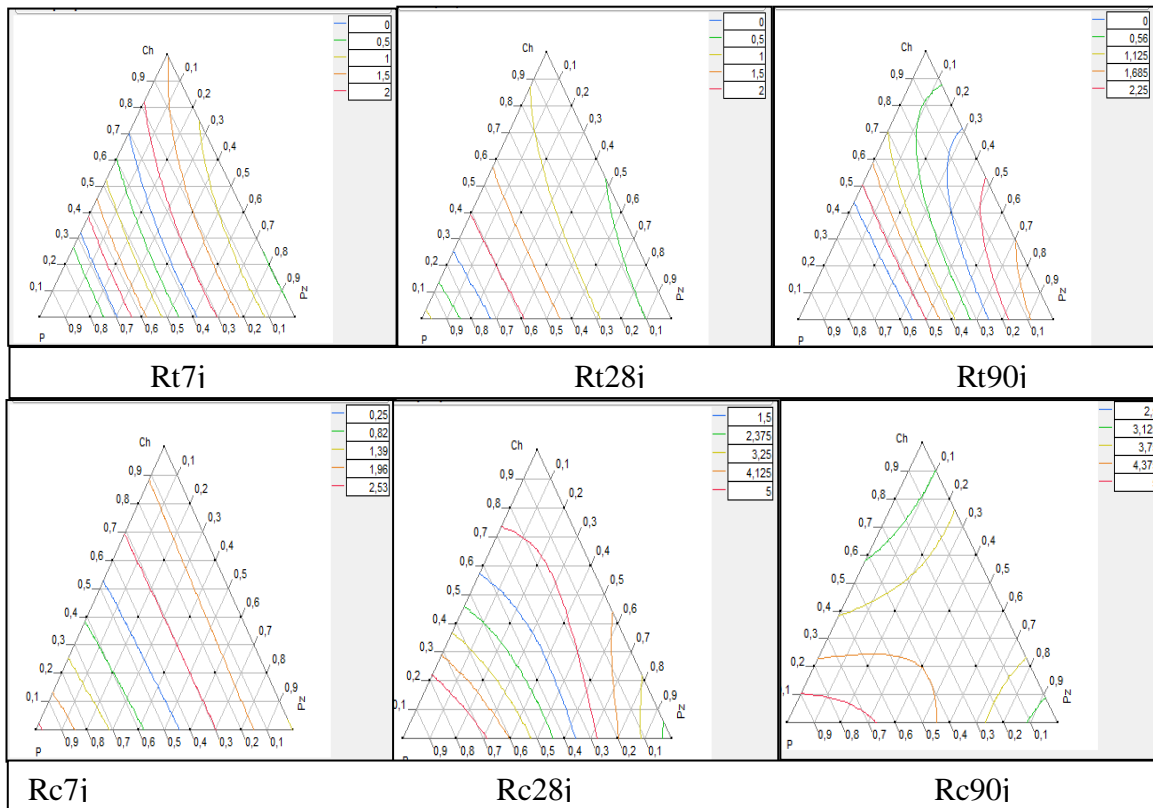


Fig. III.13. Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à la flexion à 7 , 28jours et à 90 jours.

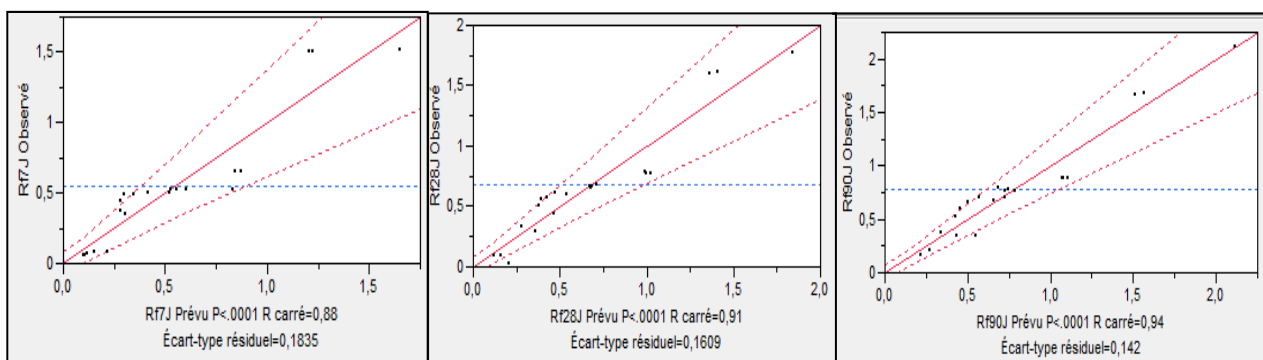


Fig. III.14 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses Rfij.

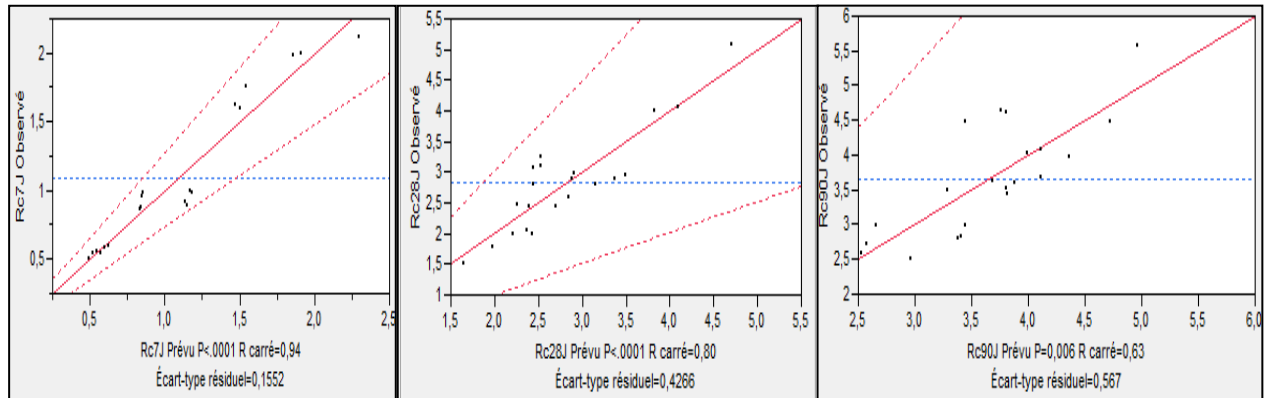


Fig. III.15 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses $R_{c_{ij}}$.

L'observation des courbes représentées dans les figures III. 14 et III. 15, nous permet de voir la bonne répartition du nuage de points des valeurs observées en fonction des valeurs prévues. Ces résultats indiquent principalement que le modèle utilisé est bien ajusté.

III.2.2.3 Cas 3 : 50% Plâtre

Dans cette partie, la substitution est réalisée, en poids, sur la moitié du plâtre (50%) par le plâtre, la chaux et la pouzzolane. Dans ce cas, il faut que les proportions de tous les autres composants du BSAD (agrégat, filler, et eau) restent constantes.

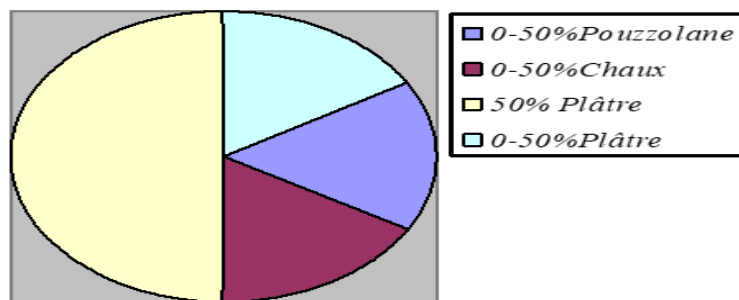


Fig. III. 16 Procédure de substitution du Plâtre.

En effet, on remplace totalement le ciment par le Plâtre, exactement comme on a fait dans le cas de la chaux.

III.2.2.3.1 Exploitation des résultats du plan de mélange

Les 21 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois facteurs (Ch : Chaux, P : Plâtre, Pz : pouzzolane) ont été expérimentalement étudiés et ont conduit à l'exploitation des 21 résultats ainsi obtenues. Ces résultats sont résumés dans le tableau III. 14 selon leurs ordres de préparations dans le laboratoire. On rappelle que dans ce cas on utilise un rapport $E/Ch = 0.85$.

Taux de gâchage : Le rapport E/P (eau/plâtre) définit la quantité d'eau nécessaire pour hydrater une quantité de "poudre de plâtre". Ce rapport est appelé taux de gâchage. La quantité d'eau nécessaire pour hydrater l'hémihydrate en gypse est de 0,186 g d'eau pour 1 g d'hémihydrate, ce qui représente un rapport E/P de 0.186. En pratique, cette valeur conduit à une pâte très épaisse, difficile à mettre en œuvre. En général, le gâchage du plâtre se fait avec un rapport E/P (0.3–0.5) pour l'hémihydrate α et un rapport (0.5–1.2) pour l'hémihydrate β . L'eau en excès par rapport à la stœchiométrie doit s'évaporer, ce qui provoque la formation de pores. Cette porosité en fonction du taux de gâchage, influence les propriétés mécaniques finales [21].

Tableau III. 14 Résultats des tests de caractérisation mécaniques.

N ° de l'échantillon (P,Ch,Pz)	Rf en MPa			Rc en MPa		
	7j	28j	90j	7j	28j	90j
SC01	0.36	1.80	1.78	0.77	2.92	2.64
SC02	0.48	1.01	2.55	1.21	3.47	4.72
SC03	0,49	1.25	2.56	1.30	4.05	4.73
SC04	1.00	1.65	2.16	1.52	4.01	4.23
SC05	1.01	1.75	1.83	1.66	4.17	4.22
SC06	1.52	1.78	1.81	2.12	5.07	5.57
SC07	0.42	1.88	1.87	0.88	2.95	3.24
SC08	0.70	2.64	3.00	0.80	4.85	4.68
SC09	0.75	2.47	3.25	1.04	4.65	5.48
SC10	0.75	2.47	2.00	1.03	4.66	5.40
SC11	0.73	2.50	2.08	1.02	4.76	3.62
SC12	0.52	2.39	2.13	1.09	3.63	3.67
SC13	1.10	3.29	2.75	2.19	4.42	6.51
SC14	1.20	3.30	3.17	2.20	5.36	6.38
SC15	1.27	6.44	3.67	2.61	5.47	5.23
SC16	1.23	2.75	2.52	2.00	5.81	4.50
SC17	2.35	3.63	3.70	4.59	6.715	6.88
SC18	2.45	3.67	3.62	4.60	6.71	6.40
SC19	1.30	3.69	3.60	1.62	5.82	7.65
SC20	1.96	3.70	3,61	2.00	6,72	6.00
SC21	3.22	3.82	3.80	6.37	7.37	7.17

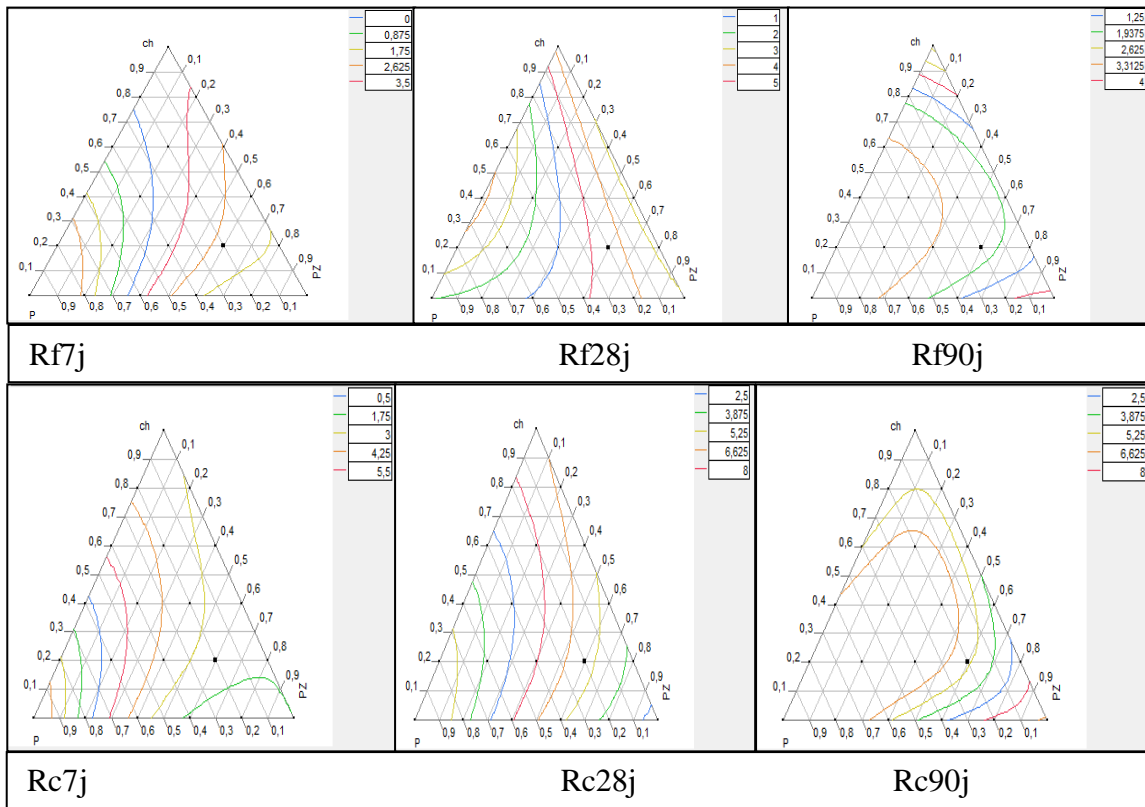


Fig. III. 17 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à flexion à 7, 28 jours et à 90 jours.

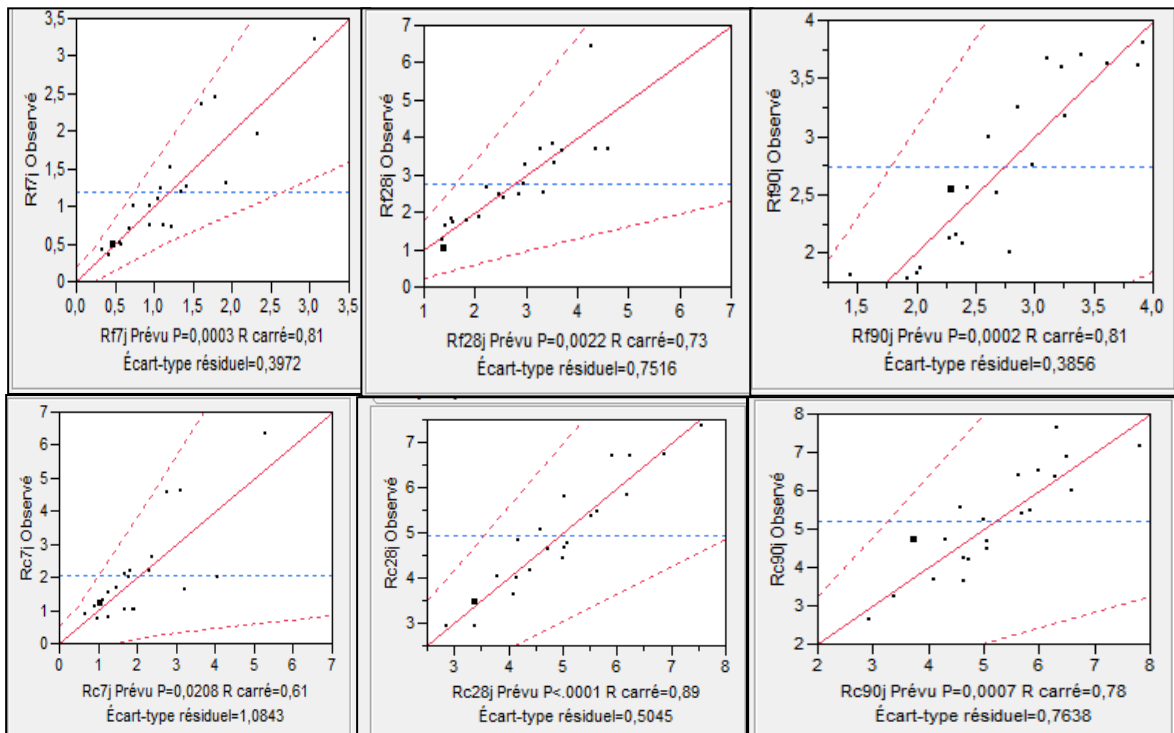


Fig. III. 18 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses R_{fij} , R_{cij}

Tableau III.15 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées

Résistance	R ²		Coefficients	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Rf7j	R ² =0.81	P	03.06	0.32882648	09.32	<0.0001*
		L	01.21	0.32882648	03.68	0.0025*
		Pz	00.41	0.32882648	01.26	0.2280
		P*L	-02.26	1.53242125	-01.48	0.1611
		P* Pz	-03.84	1.53242125	-02.51	0.0249*
		L*Pz	-00.63	1.53242125	-00.41	0.6850
Rf28j	R ² =0.73	P	03.52	0.62215404	05.65	<0.0001*
		L	01.84	0.62215404	02.96	0.0102*
		Pz	01.53	0.62215404	02.45	0.0275*
		P*L	07.29	2.89940781	02.51	0.0246*
		P* Pz	00.94	2.89940781	00.32	0.7496
		L*Pz	-01.26	2.89940781	-00.43	0.6694
Rf90j	R ² =0.81	P	03.92	0.31914331	12.28	<0.0001*
		L	01.43	0.31914331	04.50	0.0005*
		Pz	01.92	0.31914331	06.03	<0.0001*
		P*L	02.83	1.48729504	01.90	0.077
		P* Pz	-01.85	1.48729504	-01.24	0.2329
		L*Pz	02.93	1.48729504	01.97	0.0687
Rc7j	R ² =0.61	P	05.28	0.89752769	05.88	<0.0001*
		L	01.69	0.89752769	01.88	0.0801
		Pz	00.99	0.89752769	01.11	0.2852
		P*L	-03.13	4.18272426	-00.74	0.4666
		P* Pz	-07.45	4.18272426	-01.78	0.0965
		L*Pz	-00.62	4.18272426	-00.15	0.8824
Rc28j	R ² =0.89	P	07.54	0.41758224	18.07	<0.0001*
		L	04.58	0.41758224	10.96	<0.0001*
		Pz	02.86	0.41758224	06.85	<0.0001*
		P*L	-00.55	1.94604734	-00.28	0.7807
		P* Pz	-02.67	1.94604734	-01.37	0.1903
		L*Pz	01.06	1.94604734	00.54	0.5930
Rc90j	R ² =0.78	P	07.83	0.63226911	12.38	<0.0001*
		L	04.59	0.63226911	07.26	<0.0001*
		Pz	02.94	0.63226911	04.65	0.0004
		P*L	-03.72	2.94654682	-01.26	0.2272
		P* Pz	-03.35	2.94654682	-01.14	0.2733
		L*Pz	02.92	2.94654682	00.99	0.3374

On remarque que les résistances mécaniques se développent dans les premiers 28 jours de l'hydratation et elles sont faibles pour tous les bétons de sable étudiés. En effet, le béton de sable témoin à 100% plâtre (SC21), la résistance à la compression est relativement forte. Cela est dû au pourcentage élevé de plâtre.

Les résistances à la compression et à la traction, augmentent avec le temps, surtout pour l'échéance entre 7 et 28 jours.

On remarque également que la résistance mécanique se développe de manière très lente après 28 jours avec une augmentation de celle-ci dans la plupart des échantillons. L'augmentation de la résistance au-delà de 28 jours est due à la réaction pouzzolanique très lente, entre la pouzzolane et la chaux.

Les dosages de (SC21 ,100% de plâtre) présentent des valeurs optimales pour lesquelles la résistance à la compression atteint une valeur maximale (la meilleure résistance) avec une augmentation de résistance d'environ 67% par rapport à SC06 (100% Ch), et une augmentation de résistance d'environ 31% par rapport à SC06 (50% Ch +50% P).

La même chose a été remarquée pour les SC20 (80% P + 20% Ch + 00% Pz), SC17 (60% P + 20% Ch+ 20% Pz), qui occupent le deuxième rang en terme de résistance mécanique ; il y avait une faible résistance mécanique d'environ 09% par rapport à SC21 (100% de plâtre), mais avec une augmentation de plus de 60% par rapport au béton de sable à 100% chaux : SC06, et de plus de 23% par rapport au béton de sable à 50% de chaux +50% de plâtre.

La même chose pour les bétons SC18 (60% P + 40% Ch + 00% Pz), SC19 (80% P + 00% Ch + 20% Pz), SC16 (60% P + 00% Ch + 40% Pz), SC14 (40% P + 40% Ch + 60% Pz), SC15 (40% P + 60% Ch + 00% Pz), SC06 (00% P + 100% Ch + 00% Pz), qui occupent le troisième rang en terme de résistance mécanique. On a obtenu une résistance mécanique plus faible d'environ 26% par rapport à SC21 (100% de plâtre) et plus élevée d'environ 06 % par rapport à (50% de chaux, 50% de plâtre), mais avec une augmentation de 50% par rapport à (100% Ch).

La valeur minimale de résistance est enregistrée pour le béton SC01 (00% P + 00% Ch + 100% Pz), où on note une chute de résistance mécanique d'environ 59 % par rapport à SC21 (100% de plâtre). En général, un taux élevé de pouzzolane a engendré une influence négative sur la résistance mécanique. En comparant SC06 (100% Ch) et SC01 (100% Pz) c'est-à-dire 50% Pouzzolane, il semble que la chaux est la plus avantageuse pour la résistance mécanique dans ce type de béton.

En outre, les courbes d'iso-réponses donnent les diagrammes ternaires, comme illustré dans la figure III. 17. Ces courbes peuvent donner une idée sur l'évolution de la résistance mécanique au jeune âge et à 90 jours en fonction de chacun des facteurs P, Ch et Pz. Selon ces schémas, la combinaison des effets de P, Ch et Pz peuvent conduire aux constatations suivantes :

Pour un dosage fixe de plâtre P, l'augmentation de la pouzzolane Pz avec la diminution de la chaux Ch diminue la résistance mécanique.

En effet, c'est la résistance à 28j qui augmente avec l'augmentation du pourcentage de la chaux et la diminution du pourcentage de la pouzzolane dans ce type de béton. Malheureusement, il n'existe pas des études exhaustives sur les mortiers ou sur des bétons de plâtre. L'absence de ces études, nous a conduit à faire des essais sur différentes compositions de bétons de plâtre à base de sable au sein du laboratoire de Génie Civil de Laghouat et ceci pour la compréhension des propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés.

Selon les résultats des données expérimentales, l'introduction simultanée de la chaux et de la pouzzolane dans le béton à base de plâtre conduit à un nouveau liant à base de plâtre très intéressant qui donne des résultats remarquables, surtout concernant la résistance mécanique en comparaison avec celle du béton sans plâtre. Jusqu'à présent les recherches pour ce type de béton ou bien l'utilisation du plâtre comme matériau de construction sont limitées ; en effet, les études qui existent n'ont été consacrées qu'à l'utilisation du plâtre dans la construction comme des éléments décoratifs ou comme enduits. Le plâtre est souvent mis de côté en raison de ses faibles propriétés mécaniques. Rachedi et al. [20] ont réalisé des travaux sur la manière de l'ajout du sable de dunes et les fibres de palmier au plâtre, afin de trouver un mortier ayant des propriétés physiques et mécaniques qui permettent son utilisation dans la construction, c'est-à-dire, améliorer sa résistance à la traction et diminuer sa fragilité. D'après cette étude, il a été constaté que la résistance à la compression du mortier de plâtre renforcé par des fibres de palmier dattier augmente par rapport au mortier non fibré, ce qui peut être expliqué, d'après Rachedi[20], par le fait qu'un taux bien déterminé de fibres joue le rôle de gros agrégats comme dans le béton ordinaire, et la chute qui apparaît après cette augmentation, est expliquée par le fait qu'un excès de fibre perturbe le squelette minéral du mortier en créant des vides à l'intérieur de la pâte et en augmentant par conséquent sa porosité. Ces constatations sont en accord avec la plupart des recherches effectuées, tel que Kriker [22] dans ses recherches sur le béton renforcé par les fibres de palmier dattier. La valeur maximale de résistance à la compression a atteint la valeur de $R_c = 13\text{MPa}$ et $R_f = 5\text{MPa}$ pour la résistance à la traction. Les mêmes constatations ont également été faites par Fabien [23] qui a étudié les comportements mécaniques, thermiques et hygrométriques d'un matériau de construction à base de plâtre renforcé par des fibres d'origine végétale. Par une vaste campagne d'expérimentation, les résultats montrent que la présence des fibres augmentent la rigidité et la ductilité et limitent considérablement la propagation des fissures dans le plâtre, bien sûr dans ce cas, le plâtre est utilisé comme une pâte pure. D'autre part, Benali [24] a étudié la formulation d'un mortier à base de plâtre et de sable pour la fabrication d'un nouveau bloc de brique.

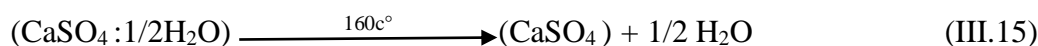
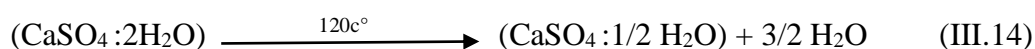
Cette étude s'est concentrée sur l'incorporation de sable dans une matrice de plâtre afin d'obtenir un mortier ayant des propriétés mécaniques suffisantes et meilleures par rapport aux propriétés de la pâte de plâtre pure. Selon les résultats des essais sur des propriétés physiques et mécaniques obtenus sur des éprouvettes de différents mélanges, on a montré que l'ajout de sable de dunes provoque une diminution de la résistance à la compression du plâtre. Il a été également remarqué que la composition optimale adoptée du mortier est de (50% de sable + 50% de plâtre) qui a servi par la suite à la fabrication d'un nouveau bloc de brique exploitable à l'âge de un jour. En effet, à part l'aspect économique, le choix du mélange (50% de sable + 50% de plâtre) n'était pas arbitraire mais c'est suite aux résultats encourageants du produit que ce choix a été fait. L'objectif était donc de concevoir un nouveau produit, à la fois, économique et écologique.

Une autre étude menée par Etyana [25] ayant pour objectif la valorisation des sulfates de calcium (gypse naturel, gypse recristallisé, plâtre) a été réalisée. Des liants hydrauliques sont ainsi réalisés par ajout de faibles quantités de clinker sulfo-alumineux afin d'évaluer leur stabilité à l'eau. Un contenu minimal a été déterminé (30 %) de clinker sulfo-alumineux assurant la stabilité à l'eau des mélanges. Cependant, il est apparu que les mélanges contenant les deux gypses (naturel ou recristallisé) possèdent une structure cimentaire identique ; celle du liant à base d'hémi-hydrate est un cas particulier. Dans ce même sens, Abidi et al. [26] ont étudié un nouveau liant à base de plâtre et de clinker sulfo-alumineux. L'objectif de cette étude était d'apprécier l'impact de l'ajout du clinker sulfo-alumineux au mortier de plâtre sur sa résistance et sa tenue à l'eau, puis d'évaluer la nécessité de transformer le gypse en plâtre. Le but de l'utilisation du clinker sulfo-alumineux est que ce dernier produit à une température inférieure à celle du clinker portland et la porosité de la pâte préparée à partir du ciment sulfo-alumineux est inférieure à celle du ciment portland. La réaction entre le clinker portland et le plâtre produit également une ettringite gonflante, par contre avec le clinker sulfo-alumineux, elle produit une ettringite qui peut être stable. L'étude s'est basée sur un mortier normalisé composé d'une partie de ciment, pour trois parties de sable et un rapport eau/ciment variable avec l'utilisation de la méthode des plans d'expérience. Les résultats montrent que pour la pâte de plâtre pure et les mortiers de plâtre sans clinker sulfo-alumineux, la résistance à la flexion diminue entre 2 à 28 jours. Par contre, pour les mortiers contenant le clinker sulfo-alumineux, la résistance à la flexion augmente entre 2 à 28 jours. La résistance maximale pour un mortier de plâtre avec clinker sulfo-alumineux et un rapport $E/L=0.7$ atteint respectivement 2.5 MPa et 3 MPa. Concernant la résistance en compression, les résultats montrent que la formule contenant le (plâtre, sable, CSA, $E/L=0.7$) donne les résistances les plus élevées ($RC7j=10.37$ MPa) puis diminue jusqu'à ($RC28j=8.24$ MPa).

Par contre pour la formule contenant le (plâtre, sable, CSA, E/L=0.6), la résistance en compression est croissante de 2 à 28 jours. A noter que la résistance en compression pour un mortier de plâtre avec clinker sulfo-alumineux augmente en augmentant le rapport E/L. La perte de masse pour le mortier de plâtre avec clinker sulfo-alumineux varie uniquement entre 3% et 7%, et la perte de résistance en compression est seulement de 20%.

Dans ce sens, deux études ont été réalisées par Rémillon en 1962 concernant un béton en plâtre à base de graviers de grès et un autre à base de graviers de gypse [18]. Les résultats de ces études montrent que les agrégats de gypse présentent une meilleure résistance à la compression (10MPa), une meilleure résistance à la traction par flexion (1,3 MPa) et un module d'élasticité linéaire de 15 GPa. Si nous comparons ces résultats avec nos résultats sur les propriétés mécaniques, nous concluons que les résultats sont presque identiques, bien que dans notre cas on n'a pas utilisé de gros agrégats ou du clinker ; en réalité, on peut dire que ces résultats sont encourageants pour une éventuelle utilisation de ce type de liants dans la restauration des bâtiments anciens et historiques pour la conservation de notre patrimoine. D'autres auteurs, comme Yu et Brouwers [27, 28], ont utilisé un β -hémihydrate comme liant et un agrégat léger (LWA, 0-2 mm dans différentes gammes de tailles) comme agrégat ; l'étude a démontré que ce nouveau composite présente des propriétés thermiques et mécaniques significativement améliorées. Même Gabrron et al. [29] sont arrivés à trouver une augmentation de la résistance à la flexion allant jusqu'à 116,2% (5,34 N/mm²), par rapport à l'utilisation traditionnelle (2,47 N/mm²), dans la conception des dalles faites de plâtre et de roseau commun. Ces matériaux ont été utilisés, à la fois, dans des éléments esthétiques, tels que les éléments de cloisons ou les systèmes de revêtement, et dans certains éléments (systèmes de toiture et de plancher).

L'équation III.14 présente le passage du dihydrate (le gypse) à la forme héli hydrate. L'équation III.14 montre la déshydratation du semi hydrate en anhydre. Le plâtre pris est issu de la réhydratation d'héli hydrate dans l'eau suivant le chemin inverse de l'équation III.15.



Le comportement mécanique du plâtre reste timide et le nombre de travaux publiés dans ce domaine reste limité. D'après plusieurs travaux [30-31], la prise de ce matériau peut être expliquée par l'existence de deux types de liaisons principales :

(1) les ancrages mécaniques : ce sont des liaisons de type « tenon-mortaise » résultant de contraintes résiduelles suite aux variations dimensionnelles subies par le matériau lors de la prise.

(2) Les interactions entre cristaux au sein d'agrégats formés de plusieurs aiguilles ou entre aiguilles de différents agrégats.

Les propriétés mécaniques du plâtre dépendent de la taille, de la distribution de la taille et du faciès des cristaux de gypse, de la porosité et aussi de l'humidité. Lorsque la cristallisation se fait en aiguilles, l'enchevêtrement est alors optimal ; l'édifice ainsi formé est consolidé par la formation de liaisons tenon-mortaises, alors les propriétés du plâtre sont meilleures. Une distribution de taille homogène et des aiguilles petites et nombreuses permettent une meilleure cohésion du matériau. En revanche, après l'adsorption d'un petit pourcentage d'eau, les propriétés mécaniques du plâtre sont altérées significativement [32,33].

Contrairement aux autres matériaux de construction (ciment, béton, etc.), le plâtre est un liant hydraulique (microstructure évoluant et se développant au cours de l'hydratation), mais de structure nettement plus simple que celle du ciment [21]. L'idée de l'influence de la porosité sur les caractéristiques mécaniques du semi hydrate pris est démontrée en 2001 par S. Meille [31]. Il a étudié le comportement mécanique en rapport avec sa microstructure. Il a utilisé une approche basée sur la propagation des ondes ultrasoniques.

Il est techniquement possible de mélanger le plâtre avec le sable de façon à obtenir des plâtres amaigris ou mortiers de plâtre. L'objectif poursuivi est alors de réaliser des économies ; ce type d'étude d'une manière complète serait d'ailleurs très difficile à mener, car les caractéristiques finales des mortiers sont très fortement influencées par la nature et les proportions des matériaux utilisés, c'est-à-dire, le plâtre et le sable.

L'ajout du sable au plâtre influe directement sur les propriétés physiques et mécaniques du mélange résultant. Il est très clair que cet ajout affecte certaines propriétés telles que le temps de prise, la densité et les résistances mécaniques.

L'absence des études, nous a conduit à rechercher une composition pour notre béton de plâtre par des essais expérimentaux afin d'atteindre les propriétés physiques et mécaniques du matériau, qui sont différents évidemment de celles de plâtre de base.

III.2.2.4 Cas 4 : cas de polymère

On a décidé de réaliser des composites à bases des sables avec différentes teneurs en polymère dont le rapport $\text{Pol}/\text{C} \leq 20\%$, avec Pol : polymère soluble et C : ciment.

Le béton utilisé dans notre étude se compose des proportions en masse suivantes :

- 80 % en masse de la composition du liant est ciment et plâtre ;
- 20 % en masse de la composition du liant est variable (pouzzolane, polymère, chaux, ciment et plâtre) ;
- Le rapport $\text{E}/\text{C}(\text{liant}) = 0.6$ constant pour tous les bétons.

L'étude du béton de sable avec deux types de liants (plâtre, ciment) et un ajout minéral (pouzzolane), envisagés à l'état binaire et à l'état ternaire en utilisant la méthode des plans d'expériences. La substitution est réalisée, en poids, sur les 80% de liant.

III.2.2.4.1 Plans de mélanges proposés

Il a été décidé de réaliser deux cas : **Cas n°01** et **Cas n°02**.

III.2.2.4.1.1 Cas n°01 : cas de ciment

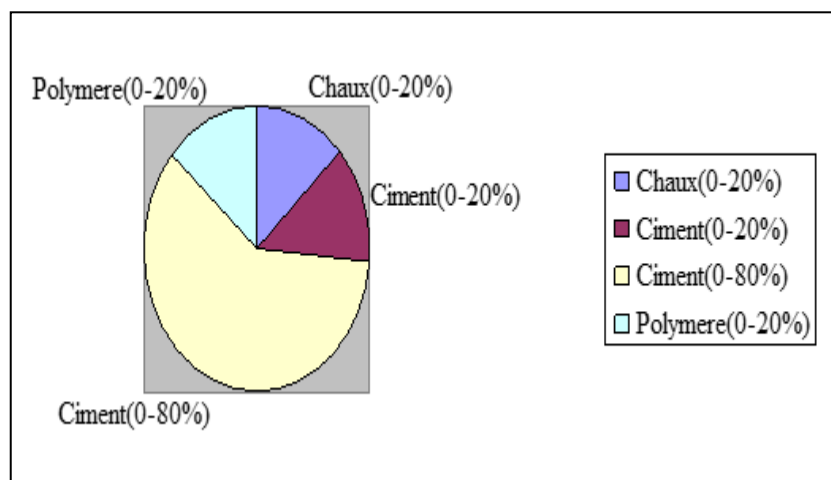


Fig. III. 19 Procédure de substitution du Ciment.

III.2.2.4.1.2 Cas n°02 : cas de plâtre

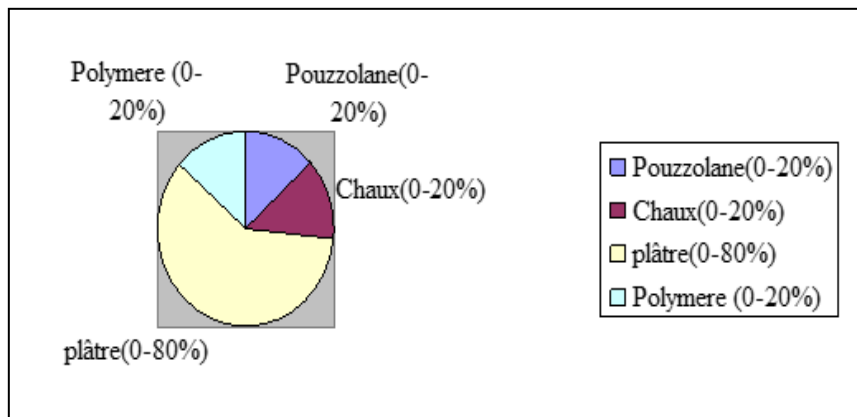


Fig. III. 20 Procédure de substitution du plâtre.

Tableau III. 16 Les 21 essais donnés par la méthode des plans d'expériences - *cas I*

N° des essais	F1= Ciment	F2 = Chaux	F3 = Polymère
01	0.4	0.0	0.6
02	0.2	0.8	0.0
03	0.0	0.6	0.4
04	0.2	0.0	0.8
05	0.2	0.2	0.6
06	0.2	0.6	0.2
07	0.6	0.0	0.4
08	0.8	0.2	0.0
09	1.0	0.0	0.0
10	0.0	0.4	0.6
11	0.6	0.4	0.0
12	0.0	0.0	1.0
13	0.8	0.0	0.2
14	0.0	0.2	0.8
15	0.2	0.4	0.4
16	0.4	0.2	0.4
17	0.0	1.0	0.0
18	0.4	0.4	0.2
19	0.4	0.6	0.0
20	0.0	0.8	0.2
21	0.6	0.2	0.2

Tableau III. 17 Les 21 essais donnés par la méthode des plans d'expérience – cas2

N° des essais	F1= Pouzzolane	F2=Chaux	F3= Polymère
01	0.4	0.0	0.6
02	0.2	0.8	0.0
03	0.0	0.6	0.4
04	0.2	0.0	0.8
05	0.2	0.2	0.6
06	0.2	0.6	0.2
07	0.6	0.0	0.4
08	0.8	0.2	0.0
09	1.0	0.0	0.0
10	0.0	0.4	0.6
11	0.6	0.4	0.0
12	0.0	0.0	1.0
13	0.8	0.0	0.2
14	0.0	0.2	0.8
15	0.2	0.4	0.4
16	0.4	0.2	0.4
17	0.0	1.0	0.0
18	0.4	0.4	0.2
19	0.4	0.6	0.0
20	0.0	0.8	0.2
21	0.6	0.2	0.2

Tableau III. 18 Contenu des liants dans le béton étudié - Cas 1

N° des essais	Liant total (kg/m ³)	Partie fixe de ciment (kg / m ³)	Matériaux substitués		
	C+C'	C'	F1= 1ciments	F2= chaux	F3= Polymère
SC01	350	280	28	00	42
SC02			14	56	00
SC 03			00	42	28
SC 04			14	00	56
SC 05			14	14	42
SC 06			14	42	14
SC 07			42	00	28
SC 08			56	14	00
SC 09			70	00	00
SC 10			00	28	42
SC 11			42	28	00
SC 12			00	00	70
SC 13			56	00	14
SC 14			00	14	28
SC 15			14	28	28
SC 16			28	14	28
SC 17			00	70	00
SC 18			28	28	14
SC 19			28	42	00
SC 20			00	56	14
SC 21			42	14	14

Tableau III. 19 Contenu des liants dans le béton étudié - Cas 2.

N° des essais	Liant total (kg/m ³)	Partie fixe de Plâtre (kg / m ³)	Matériaux substitués (kg / m ³)		
	P+P'	P'	F1= Pouzzolane	F2= chaux	F3= Polymère
SC01	350	280	28	0	42
SC02			14	56	0
SC 03			0	42	28
SC 04			14	0	56
SC 05			14	14	42
SC 06			14	42	14
SC 07			42	0	28
SC 08			56	14	0
SC 09			70	0	0
SC 10			0	28	42
SC 11			42	28	0
SC 12			0	0	70
SC 13			56	0	14
SC 14			0	14	28
SC 15			14	28	28
SC 16			28	14	28
SC 17			0	70	0
SC 18			28	28	14
SC 19			28	42	0
SC 20			0	56	14
SC 21			42	14	14

Tableau III.20 Résultats des tests de la caractérisation mécanique dans le cas1 cas de ciment

N ° de l'échantillon	Rf en MPa			Rc en MPa		
	7j	28j	90j	7j	28j	90j
SC01	1.85	1.26	1.46	09.04	15.08	15.10
SC02	1.40	1.59	1.70	20.00	26.10	27.03
SC 03	1.87	1.46	1.09	09.06	15.00	15.04
SC 04	1.28	1.40	1.69	07.76	11.18	11.20
SC 05	1.03	1.12	1.40	09.06	15.00	15.08
SC 06	1.31	1.68	2.88	10.85	18.38	19.96
SC 07	1.17	1.35	1.62	09.00	15.00	15.00
SC 08	1.64	1.75	2.43	20.01	28.42	19.74
SC 09	2.77	2.90	2.96	23.00	30.07	30.10
SC 10	1.14	0.60	1.58	08.27	13.16	13.20
SC 11	2.02	2.80	2.90	22.01	27.00	28.50
SC 12	0.91	1.03	1.03	08.06	09.57	09.60
SC 13	1.28	1.45	2.11	10.38	18.00	18.01
SC 14	0.65	0.72	1.78	08.72	10.37	10.59
SC 15	1.03	1.31	1.78	09.15	15.26	15.20
SC 16	1.12	1.40	2.30	09.55	15.74	15.92
SC 17	1.491	1.687	1.89	19.45	23.17	23.97
SC 18	1.406	1.78	1.99	10.50	18.05	19.45
SC 19	1.172	1.701	1.55	19.675	28.48	28.67
SC 20	1.148	1.53	2.93	08.893	15.15	16.70
SC 21	2.179	2.89	8.72	09.39	17.02	17.71

Tableau III. 21 Résultats des tests de la caractérisation mécanique dans le cas 2 cas de plâtre

N ° de l'échantillon (Pz ,Ch,Pl)	Rf en MPa à l'âge de			de Rc en MPa à l'âge		
	7j	28j	90j	7j	28j	90j
SC01	2.10	2.39	2.34	3.60	3.20	3.53
SC02	1.20	1.82	1.90	1.60	4.20	2.22
SC 03	2.41	1.85	1.76	4.36	2.90	2.66
SC 04	2.11	2.03	2.09	3.80	3.42	2.49
SC 05	2.36	1.85	1.43	3.53	2.87	2.46
SC 06	1.87	2.01	1.85	4.31	3.67	2.66
SC 07	1.92	2.01	4.20	4.43	3.41	3.96
SC 08	0.80	2.88	3.50	1,10	5.00	4,75
SC 09	3.00	3,80	3,75	6,45	7,57	7,31
SC 10	2.19	1.71	1.77	3.45	3.98	2.97
SC 11	1.10	3.30	3.34	2.19	4.42	4.33
SC 12	1.59	1.38	1.32	3.72	3.28	2.99
SC 13	2.03	1.71	1.09	4.87	3.35	3.47
SC 14	2.42	2.01	1.66	3.78	2.48	3.17
SC 15	1.85	1.38	1.11	3.49	2.49	3.50
SC 16	1.99	1.80	1.82	3.73	3.48	2.54
SC 17	0.80	2.55	2.10	1.20	4.80	3.70
SC 18	2.22	2.41	2.31	3.85	4.43	2.16
SC 19	0.55	2.00	2.80	0.70	4.00	3.90
SC 20	2.17	1.96	1.52	3.86	3.55	3.39
SC 21	1.73	1.57	1.58	4.79	4.88	3.18

III.2.2.4.2 Exploitation des résultats

Les résultats des 21 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois facteurs cas 1 (C : Ciment, Ch : Chaux , Pol : polymère) et Cas 2 (Pz : Pouzzolane , Ch : Chaux , Pol : polymère) peuvent bien exploiter les 21 compositions dans l'élaboration des modèles mathématiques décrivant l'effet du type d'ajout sur les propriétés des BDS. Ces modèles ont facilité l'appréciation de l'effet de chaque ajout séparément et en combinaison avec d'autre types d'ajout sur les propriétés des BDS, par des diagrammes ternaires avec des courbes iso-réponses. Les résultats obtenus lors des essais sont regroupés dans les tableaux III. 16-21 et illustrés par les figures III.21-24.

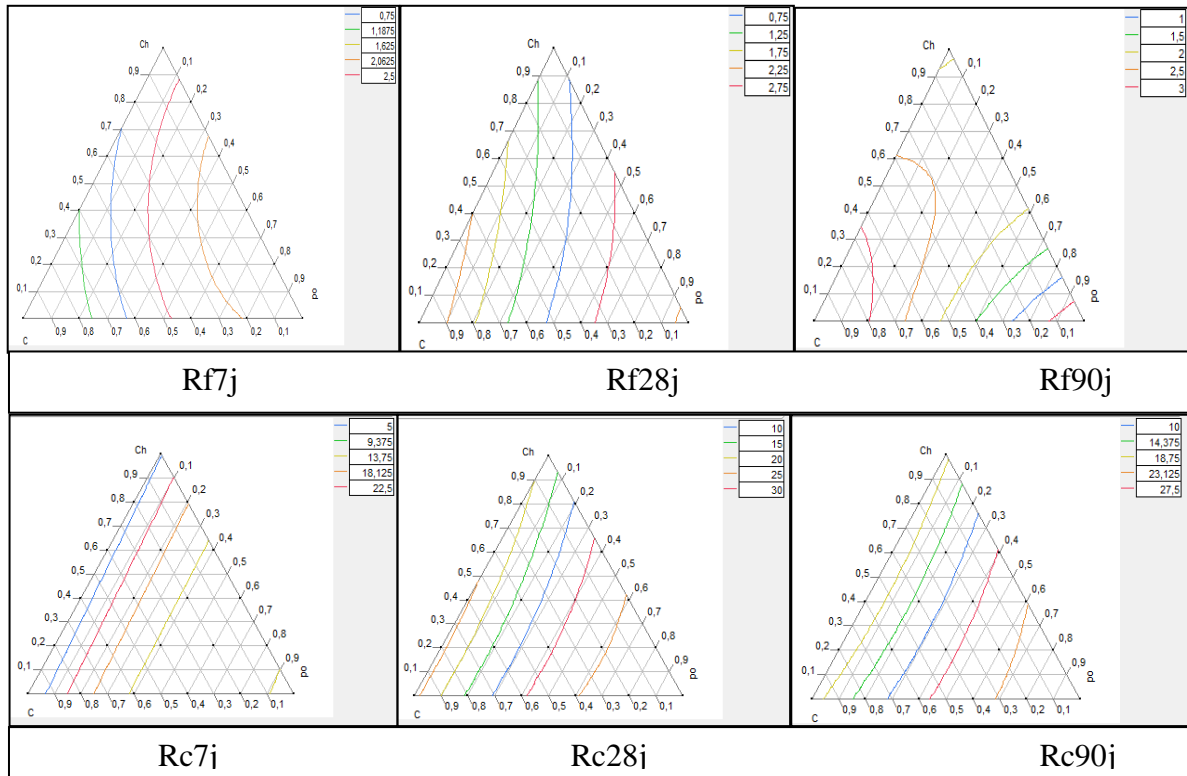


Fig. III. 21 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à la flexion à 7, 28 jours et à 90 jours - Cas 1.

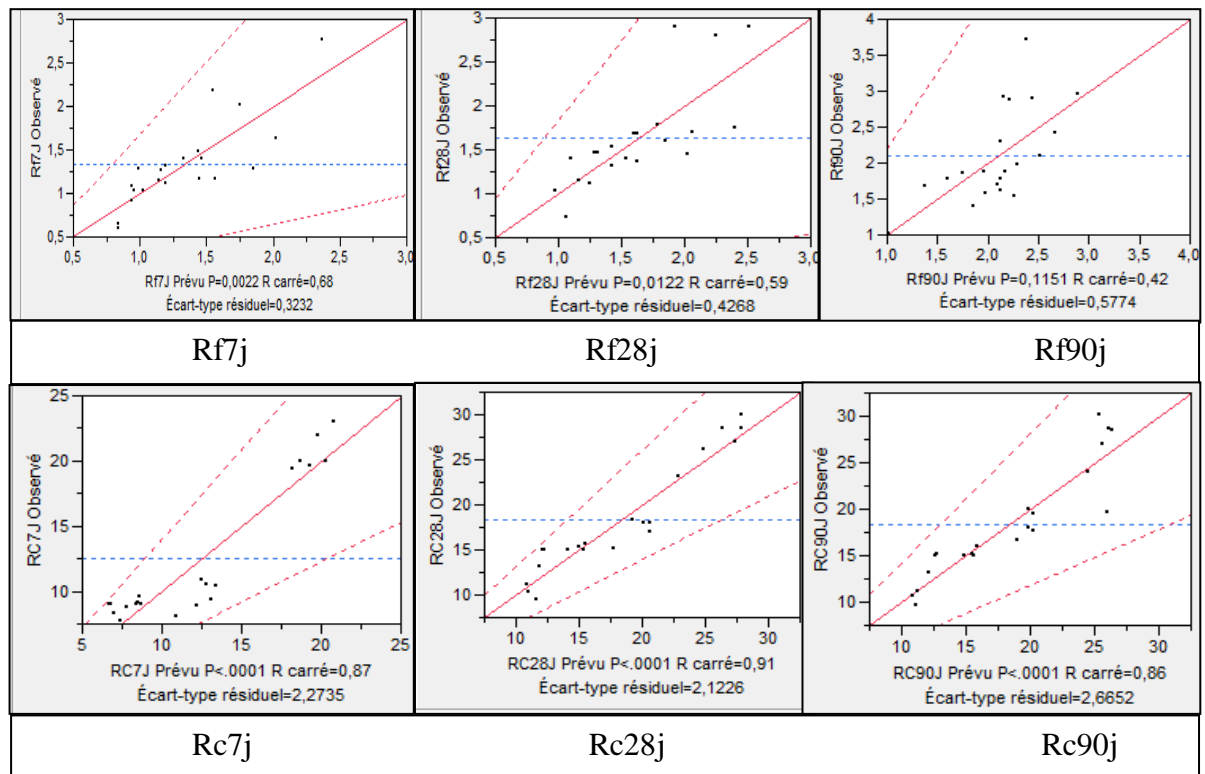


Fig. III. 22 Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses Rc_{ij} et Rf_{ij} - Cas 1.

Tableau III. 22 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées **Cas 1**.

Résistance	R ²	Comb.	Coefficients	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Rf7j	R ² =0.68	C	02.36	0.25913437	09.13	<0.0001*
		Ch	01.43	0.25913437	05.54	<0.0001*
		Pol	00.93	0.25913437	03.62	0.0025*
		C*Ch	-01.01	1.07972653	-00.94	0.3618
		C* Pol	-01.45	1.07972653	-01.34	0.1979
		Ch*Po	-01.24	1.07972653	-01.14	0.2683
Rf28j	R ² =0.59	C	02.51	0.34223359	07.35	<0.0001*
		Ch	01.59	0.34223359	04.66	0.00030*
		Pol	00.90	0.34223359	02.85	0.01192*
		C*Ch	00.40	1.4259733	00.28	0.78185
		C* Pol	-01.16	1.4259733	-00.81	0.42759
		Ch*Pol	-00.26	1.4259733	-00.18	0.85263
Rf90j	R ² =0.42	C	02.89	0.46295132	06.25	<0.0001*
		Ch	01.95	0.46295132	04.22	0.0007*
		Pol	01.00	0.46295132	02.17	0.0457*
		C*Ch	-00.30	1.92896385	-0.15	0.8779
		C* Pol	-00.05	1.92896385	-00.03	0.9785
		Ch*Pol	02.47	1.92896385	01.28	0.2198
Rc7j	R ² =0.87	C	20.82	1.82287196	11.42	<0.0001*
		Ch	18.22	1.82287196	09.99	<0.0001*
		Pol	10.86	1.82287196	05.95	<0.0001*
		C*Ch	-00.02	7.59529984	-00.01	0.9977
		C* Pol	-34.02	7.59529984	-04.47	0.0004*
		Ch*Pol	-28.47	7.59529984	-03.74	0.0019*
Rc28j	R ² =0.91	C	27.85	1.70184283	16.36	<0.0001*
		Ch	22.90	1.70184283	13.45	<0.0001*
		Pol	11.60	1.70184283	06.81	<0.0001*
		C*Ch	06.09	7.09101177	00.85	0.4045
		C* Pol	-24.83	7.09101177	-03.50	0.0032*
		Ch*Pol	-17.89	7.09101177	-02.52	0.0234*
Rc90j	R ² =0.86	C	25.32	2.1369114	11.84	<0.0001*
		Ch	24.55	2.1369114	11.49	<0.0001*
		Pol	11.06	2.1369114	05.17	<0.0001*
		C*Ch	05.47	8.90379752	00.6	0.5477
		C* Pol	-16.49	8.90379752	-01.85	0.0837
		Ch*Pol	-18.10	8.90379752	-02.03	0.0601

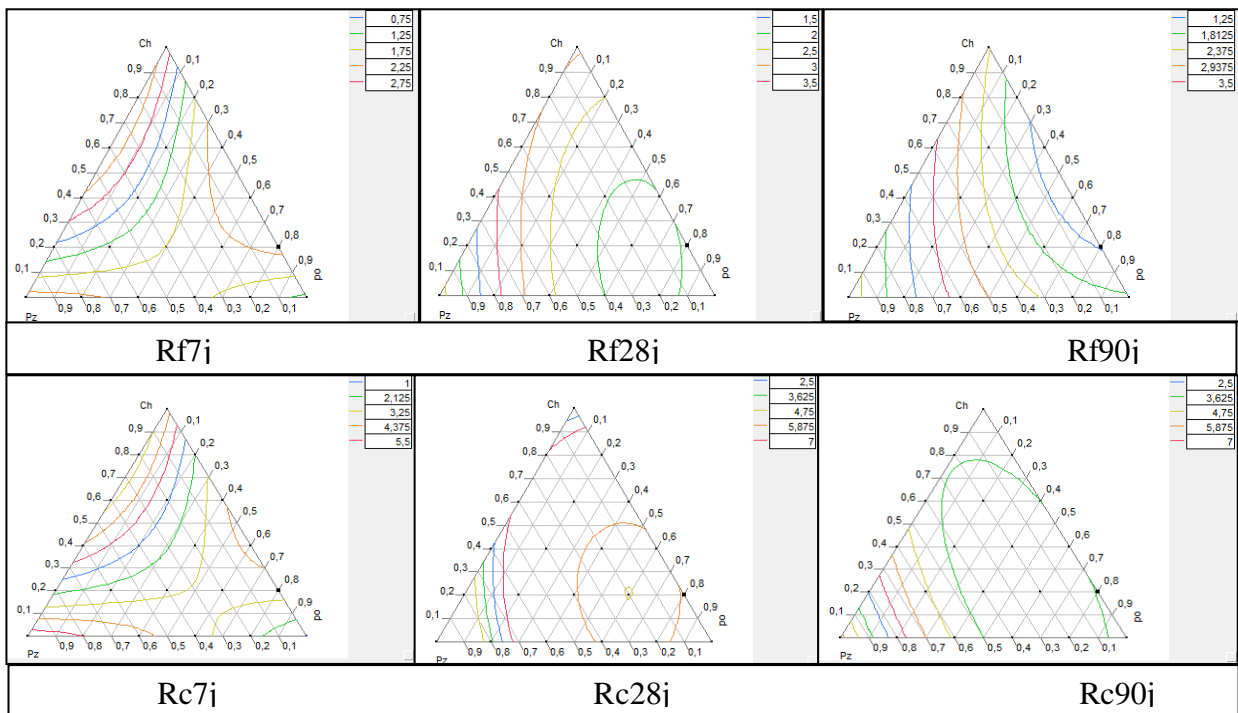


Fig. III. 23 Courbes iso-réponses de la résistance de compression et à la flexion à 7, 28jours et à 90 jours - Cas 2.

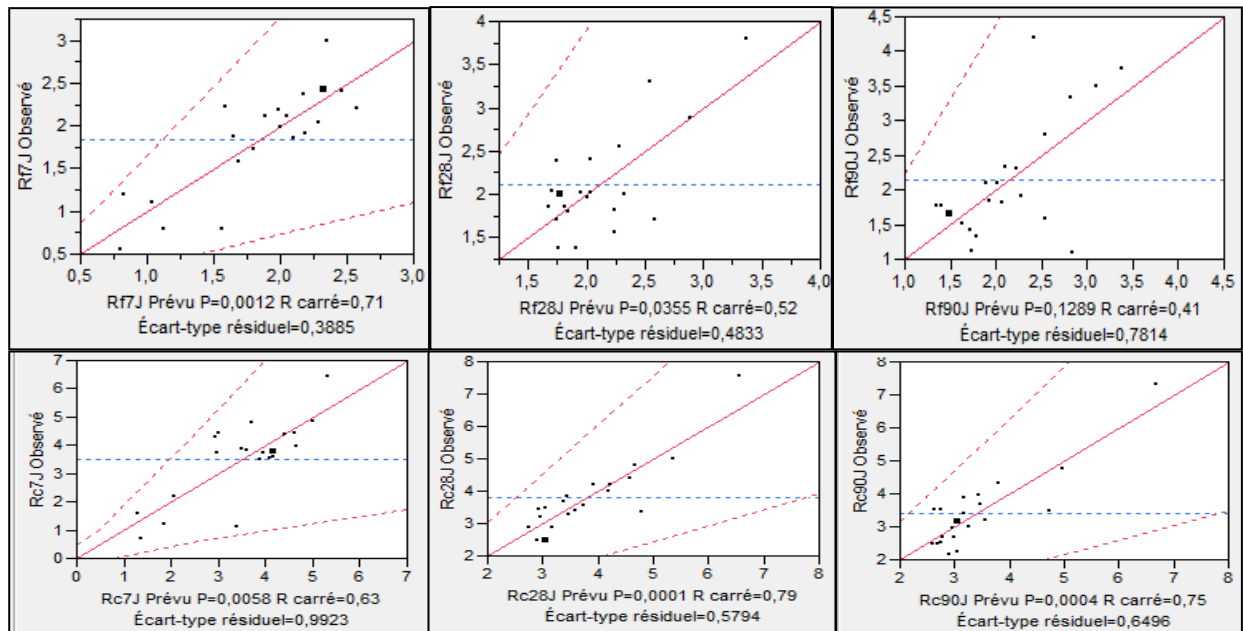


Fig. III.24. Valeurs observées en fonction des valeurs prévues des réponses Rf_{ij}, Rc_{ij} Cas 2.

Tableau III. 23 Coefficients et paramètres d'estimation des modèles des réponses étudiées - Cas 2.

Résistance	R ²	Comb	Coefficients	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Rf7j	R ² =0.71	Pz	02.35	0.31145599	07.56	<0.0001*
		Ch	01.12	0.31145599	03.61	0.0026*
		Pol	01.68	0.31145599	05.42	<0.0001*
		Pz*Ch	03.41	1.29773329	-02.63	0.0188*
		Pz * Pol	00.39	1.29773329	00.30	0.7662
		Ch*Pol	04.65	1.29773329	03.58	0.0027*
Rf28j	R ² =0.52	Pz	03.36	0.38752263	08.67	<0.0001*
		Ch	02.28	0.38752263	05.89	<0.0001*
		Pol	01.91	0.38752263	04.93	<0.0002*
		Pz*Ch	-01.63	1.61467763	-01.01	0.3273
		Pz * Pol	-03.09	1.61467763	-1.91	0.0747
		Ch*Pol	-01.31	1.61467763	-00.81	0.4290
Rf90j	R ² =0.41	Pz	03.37	0.62649405	05.39	<0.0001*
		Ch	02.01	0.62649405	03.21	0.0058*
		Pol	01.78	0.62649405	02.84	0.0124*
		Pz*Ch	-00.06	2.61039188	-00.02	0.9808
		Pz * Pol	-01.33	2.61039188	-00.51	0.6169
		Ch*Pol	-02.15	2.61039188	-00.82	0.4230
Rc7j	R ² =0.63	Pz	05.30	0.79557637	06.67	<0.0001*
		Ch	01.84	0.79557637	02.31	0.0352*
		Pol	02.98	0.79557637	03.75	0.0019*
		Pz*Ch	-07.69	3.31490154	-02.32	0.0347*
		Pz * Pol	01.01	3.31490154	00.30	0.7650
		Ch*Pol	08.84	3.31490154	02.66	0.0175*
Rc28j	R ² =0.79	Pz	06.57	0.4645456	14.14	<0.0001*
		Ch	04.65	0.4645456	10.02	<0.0001*
		Pol	03.47	0.4645456	07.48	<0.0001*
		Pz*Ch	-05.14	1.93560667	-02.65	0.0179*
		Pz * Pol	-07.29	1.93560667	-03.76	0.0019*
		Ch*Pol	-04.18	1.93560667	-02.16	0.0473*
Rc90j	R ² =0.75	Pz	06.67	0.52083076	12.81	<0.0001*
		Ch	03.47	0.52083076	06.67	<0.0001*
		Pol	03.25	0.52083076	06.24	<0.0001*
		Pz*Ch	-06.58	2.17012818	-03.03	0.0083*
		Pz * Pol	-07.81	2.17012818	-03.60	0.0026*
		Ch*Pol	-01.59	2.17012818	-00.73	0.4738

Le béton modifié aux polymères comme matériau de construction dans les applications structurelles a été largement étudié ces dernières années [34]. Le développement des composites mortier-polymère a pour origine certains besoins exprimés par les professionnels du bâtiment et des travaux publics. En vue d'améliorer les caractéristiques mécaniques, on a évalué l'influence de l'ajout du polymère soluble sur les caractéristiques de ces derniers. Le polymère utilisé dans notre cas, nommé TEKWELD et provenant de l'entreprise de TECKNACHEM, est une résine synthétique en solution aqueuse à haute densité, stable en milieu alcalin, spécialement conçue pour être additionnée à l'eau de gâchage des mortiers de ciment ou de plâtre [35].

Selon les résultats des données expérimentales, l'introduction simultanée du polymère dans le béton à base de plâtre et du ciment conduit à un nouveau liant très intéressant qui donne des résultats remarquables, surtout concernant la résistance mécanique. Contrairement aux informations contenues dans la fiche technique [35], dans notre étude, ce type de résine a amélioré les résistances à la traction et à la compression des mortiers et des bétons ; on remarque que les résistances mécaniques, notamment à la compression, des bétons résineux sont nettement inférieures à celles des bétons de sable cimentaire ou à base de plâtre. La valeur minimale de résistance est enregistrée pour le béton SC012 (20% Pol) où on a noté une chute de résistance mécanique d'environ 60 % par rapport à SC9 (100% de Ciment) dans le cas 1. La valeur minimale de résistance en flexion est enregistrée pour le béton SC015 (20% Pz + 40% Ch + 40% Pol) où on a noté une chute de résistance mécanique d'environ 60 % par rapport à SC12 (100% de Plâtre). Et contrairement aux travaux de Bonin [36] qui ont montré que la rhéologie des mortiers modifiés aux polymères peut être ajustée ainsi que le temps ouvert (délai d'utilisation du produit) pour faciliter leur application. Ces ajouts améliorent la résistance en flexion.

Par ailleurs, un taux élevé de polymère a engendré une influence négative sur la résistance mécanique ; ceci peut-être expliqué par l'influence du polymère sur le retard d'hydratation du ciment et ses propriétés rhéologiques.

Gemert [37] a constaté que, juste après le malaxage, les particules de ciment et de polymères sont dispersées dans l'eau ; l'hydratation du ciment commence, cependant, une partie des particules de polymère se dépose sur la surface des grains de ciment et sur les granulats. Une partie du polymère peut fusionner pour former un film continu qui enveloppe partiellement ou totalement les grains de ciment. Ce recouvrement retarde partiellement ou complètement l'hydratation du grain, ce qui a aussi été dit par Belkhodja dans son travail [38]. Ce dernier a conclu que les polymères entraînent une meilleure maniabilité mais retardent le processus d'hydratation. La formation d'un film de polymère dans la matrice cimentaire peut d'ailleurs gêner l'hydratation.

Notons que la formation du film de polymère a été remise en cause par Boutti [39] pour des taux de latex styrène-butyl-acrylate de 5 % en masse par rapport au ciment. Pour lui, avec un taux bien déterminé, le latex étudié n'influe pas sur les propriétés mécaniques du matériau cimentaire [39].

De son côté, Goto [40] a bien précisé que les améliorations des propriétés mécaniques dépendent de la nature du latex et du système de stabilisation du ciment, des granulats et des proportions du mélange (rapport Pol/C, rapport E/C, quantité d'air occlus par exemple). En outre, les mortiers modifiés au latex perdent un peu de leur résistance quand ils sont immergés.

D'autre part, Latroch et al. [41] ont utilisé dans leur travail le même type de polymère et ont évalué l'influence de l'ajout du polymère soluble sur les propriétés du mortier vis-à-vis des milieux agressifs tels que les acides. Ils ont utilisé des composites à bases des additions minérales avec des teneurs en polymère différentes tel que : Pol/C = (0, 5, 7.5, 10, 12.5 & 15%), avec Pol : polymère soluble et C : ciment. Les additions minérales utilisées sont la fumée de silice et la pouzzolane naturelle qu'il faut nécessairement valoriser avec des pourcentages de 25% pouzzolane naturelle et 5% fumée de silice.

D'après nos résultats expérimentaux, on peut remarquer aussi que la résistance à la traction augmente sensiblement dans le cas de l'utilisation de polymère dans les deux cas de ciment et de plâtre par rapport aux mélanges sans polymère, ce qui a été approuvé par Hirde et al. [34] à travers leur étude où ils ont démontré que l'addition de polymère améliore la maniabilité, la résistance à la traction et la résistance à la flexion. N'oublions pas aussi les travaux de Çavdar et al. [42] qui ont étudié trois différents types de polymères qui ont été ajoutés aux mortiers de ciment ; ces mortiers ont été durcis dans trois conditions de durcissement différentes. Ainsi, ils ont cherché à étudier leurs contributions mécaniques et à déterminer la condition de durcissement la plus appropriée pour le béton modifié au polymère. Les polymères choisis sont : SBR, PSBR, MAD (Styrene Butadiene Rubber (SBR), Polycarboxylate modified Stiren et Butadiene Rubber (SBR), Modified Acrylic Dispersion (MAD)). Ces polymères ont été ajoutés dans les mortiers selon cinq rapports différents (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) en volume et les mortiers sont durcis dans trois conditions différentes et arrosés deux fois par jour (FCC), 16 heures dans l'eau - 8 heures (SCC), un jour dans l'eau - une journée (TCC).

Les essais de flexion et de compression ont été réalisés selon les normes EN 196. Les échantillons testés sont formulés selon la composition : de 450 g du mélange de ciment, 1350 g de sable et 225 g d'eau et le rapport eau / ciment est donc de 0.50. D'après leurs résultats, ils ont constaté que les mortiers modifiés avec le polymère MAD montrent la meilleure performance à la flexion pour des taux d'addition de polymère choisis et la FCC est également la condition de durcissement la plus appropriée.

La résistance à la compression diminue avec l'addition de tous les types de polymères pour FCC et SCC. Cependant, il y a une légère augmentation du TCC pour le SBR avec des teneurs de 10%, 15% et 20% :

On remarque bien que les polymères contribuent à la résistance à la flexion du mortier, ils influent négativement sur la résistance à la compression. Ceci est compatible avec nos résultats.

D'une manière générale, le latex ou le polymère utilisé dans notre cas, diminue la contrainte en compression. Ce phénomène peut être dû à une augmentation de la maniabilité du mélange. A l'inverse, une augmentation de contrainte à la traction à 28 jours d'hydratation, surtout dans le cas du plâtre, est systématiquement observée en présence du latex. Nous pensons que cette augmentation est due à une diminution de la porosité du composite due à la présence du latex dans les pores du ciment et du plâtre (due au retard d'hydratation puis à la diminution de la porosité due au latex.). Cette augmentation est d'ailleurs l'un des effets majeurs recherchés lors de l'incorporation de latex au béton.

Partie B : Etude micro structurelle

III.3 Etude micro structurale

Afin d'arriver à des conclusions pratiques, il a été nécessaire de réaliser des essais d'analyse microstructurale. Dans ce but, l'identification des phases cristallines formées dans tous les bétons étudiés a été suivie par diffraction des rayons X.

III.3.1 Cas 1 : 50% Ciment

Pour cette étude, de petits morceaux ont été extraits des différents échantillons étudiés (SC09 (100% C), SC17 (100% Ch), SC12 (100% P), SC14 (80% P + 20% Ch) et SC20 (20% P + 80% Ch) et ont été broyés jusqu'à obtenir des poudres fines ($<80 \mu\text{m}$). Ces derniers ont été exposés aux rayons X afin de se faire une idée des nouveaux produits formés. L'analyse par diffraction des rayons X (Figures III.25-28) montre que les principaux produits présents dans les bétons de sable étudiés sont :

- (1) le quartz (SiO_2) ;
- (2) le carbonate de calcium (calcite), (CaCO_3) ;
- (3) les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;
- (4) la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ;
- (5) l'ettringite (ettringite primaire) ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) ; et
- (6) l'aluminate de carbone hydraté ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7\text{CO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$).

Premièrement, tous les diagrammes des Figures III.25 jusqu'à III.28 montrent que le quartz (SiO_2) est présent dans tous les échantillons étudiés. C'est tout à fait logique puisque le sable utilisé pour le développement des bétons de sable étudiés est principalement composé de silice. De plus, on peut également constater que le pic de quartz est plus élevé lorsque la pouzzolane naturelle est présente dans le composite, ce qui ressort clairement des diagrammes relatifs aux échantillons SC12 (100% P) et SC14 (80% P). Cela est aussi logique puisque le quartz est l'un des principaux composants minéralogiques de la pouzzolane naturelle.

La calcite (CaCO_3) est également présente dans tous les échantillons mais avec des proportions différentes. Le taux le plus élevé de calcite est enregistré dans le cas de SC09 (100% C). À 100% de chaux, le SC17 produit moins de calcite que le SC09 et à 100% de pouzzolane, le SC12 contient moins de calcite que le SC09. La présence de la calcite est due, d'une part, à l'utilisation de fines calcaires dans la composition du béton de sable et, d'autre part, à la réaction chimique produite entre le ciment et la chaux. Sebaibi et al. [43] ont également montré que, généralement, la substitution d'un faible pourcentage de ciment par de la chaux ne modifie pas la microstructure de la matrice de mortier.

En effet, pour un pourcentage de substitution plus élevé en chaux, le remplacement du ciment par la chaux conduit à une modification de la microstructure du mortier, révélée soit par la présence de microfissures dans la matrice, soit par un développement alternatif des hydrates. C'est probablement ce dernier qui a réduit la résistance mécanique du béton de sable dans le cas du SC17 (100% Ch). En effet, les auteurs ont soulevé le problème du choix du type de chaux dans les mortiers.

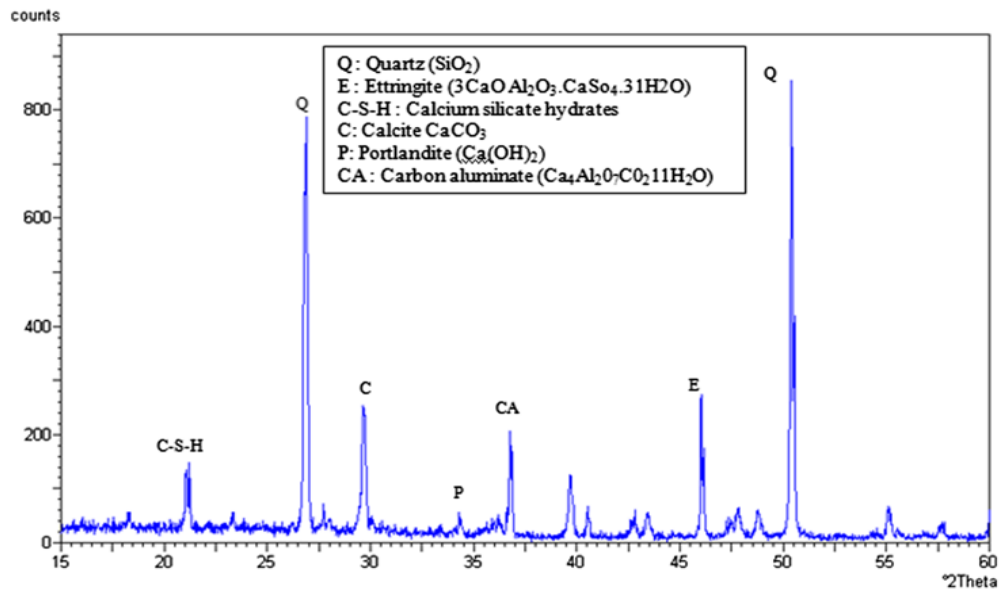


Fig. III 25. Analyse DRX de SC12 (100% P).

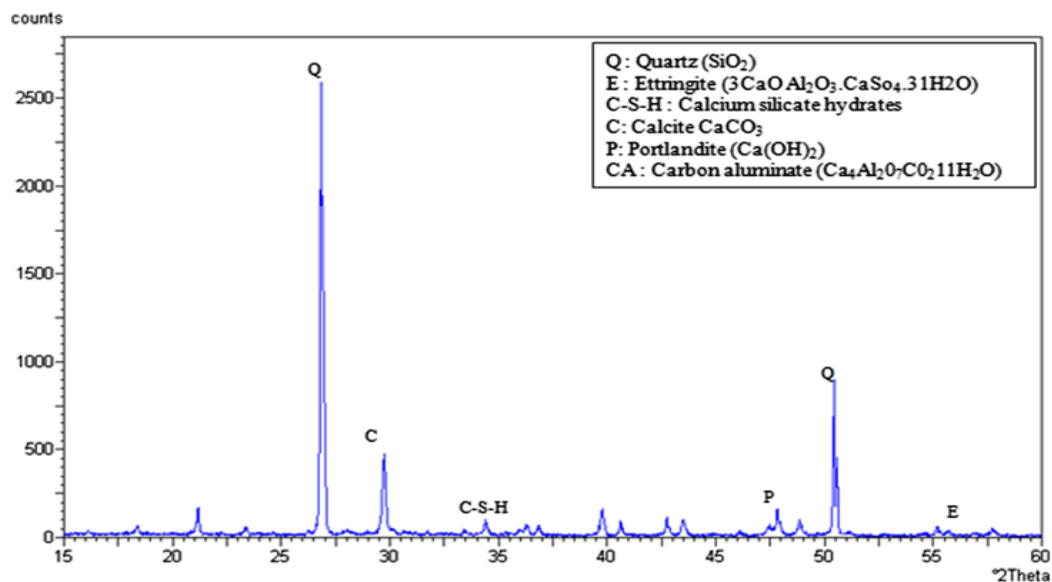


Fig. III.26 Analyse DRX de SC14 (80% P + 20% Ch).

En ce qui concerne l'addition de pouzzolane, Senhadji et al. [44] ont encore montré que les additions de pouzzolanes naturelles améliorent le comportement mécanique du béton à long terme par l'amélioration de la microstructure et la transformation du C-H en C-S-H ou C-A-S- par la réaction pouzzolanique. En revanche, ils ont montré que les pouzzolanes naturelles réduisaient la valeur de la résistance à la compression du mortier à court terme et à tous les niveaux de remplacement par rapport au mortier témoin.

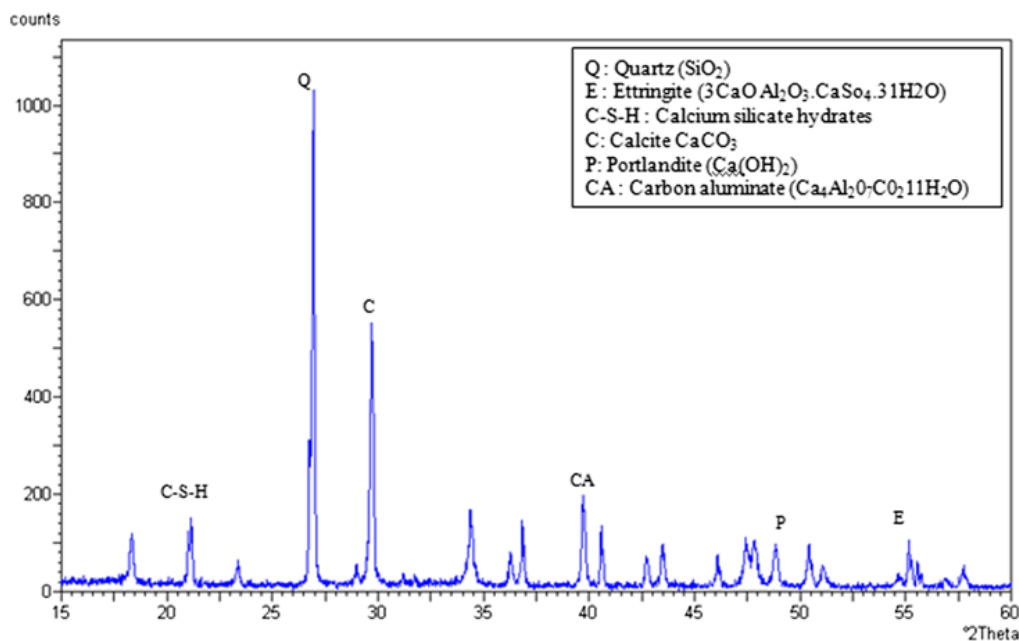


Fig. III.27. Analyse DRX de SC2 (20% P + 80% Ch).

C'est exactement ce qu'on a trouvé dans ce travail. Le SC12 (100% P) montre de faibles valeurs de résistance mécanique à un âge de 7 jours et des valeurs relativement élevées à un âge de 28 jours.

En ce qui concerne le mélange de pouzzolane et de chaux, il est clair que le développement de la calcite soit plus élevé lorsque la proportion de chaux est dominante par rapport à la pouzzolane (SC20 (80% Ch + 20% P)), c'est-à-dire que la quantité de calcite est liée à la quantité de chaux.

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui résultent généralement de l'interaction entre le ciment et l'eau (dans la pâte de ciment durcie) sont présents dans tous les échantillons étudiés car tous ces bétons contiennent une quantité de ciment de $175 \text{ kg} / \text{m}^3$ (lorsque C = 0%) à $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ (lorsque C = 100%).

Le Pic le plus élevé est enregistré dans le cas de l'échantillon SC17 (100% Ch). En comparaison avec l'échantillon SC09 (100% C), on peut en déduire que la présence de chaux dans l'échantillon (SC17) accélère l'hydratation du ciment, alors que dans l'échantillon SC09 (0% Ch), l'hydratation du ciment n'est pas entièrement achevée.

Il convient de noter que la présence de chaux pendant le processus d'hydratation favorise une hydratation continue des grains de ciment dans le temps [45,46].

En ce qui concerne la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), il y a lieu de noter que sa proportion est réduite dans la pâte de ciment en raison de la réaction pouzzolanique. Le taux le plus bas de portlandite a été enregistré dans l'échantillon SC12 (100% P). Les échantillons SC14 et SC20, contiennent une proportion de pouzzolane ; les taux de portlandite enregistrés sont inférieurs à celles des échantillons SC09 et SC17 où il n'y a pas de pouzzolane.

Lorca et al. [47] ont montré que la réactivité élevée était atteinte dans le micro-béton de ciment étudié (Pour un système composé de 50% de cendres volantes et 20% de chaux hydratée substitués avec le ciment). Ils ont démontré par analyse au microscope électronique à balayage et analyse thermogravimétrique que la nature et la quantité des produits d'hydratation et réaction pouzzolanique ont changé de manière significative en fonction des composants du système ternaire (ciment, cendres volantes et chaux hydratée). La présence de la géhlénite hydratée dans les systèmes ternaires (ciment + cendres volantes + chaux hydratée) et la réduction considérable de la teneur en hydroxyde de calcium prouvent le haut degré de réaction pouzzolanique dans ces systèmes.

Pour L'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) apparaît en faibles pics dans tous les échantillons. Plusieurs pics sont légèrement supérieurs lorsque la chaux est seule avec le ciment SC17 ou la pouzzolane est seule avec le ciment SC12. Le mélange de pouzzolane et de chaux avec du ciment réduit également la proportion d'ettringite.

Enfin et afin d'apprécier l'aspect macroscopique des composites étudiés, les échantillons SC09, SC12 et SC17 contenant respectivement 100% de C, 100% de P et 100% de Ch ont été visualisés à l'aide d'un microscope optique avec des grossissements " $G = 100$ et $G = 200$ " (Figure 28). Cette visualisation a montré que, dans chaque cas, le matériau apparaît relativement homogène et dense avec une bonne adhérence entre les agrégats et la pâte, que ce soit dans le cas du ciment, de la pouzzolane ou de la chaux. Alors, les différences enregistrées en termes de résistance mécanique sont principalement dues à la nature des hydrates produits dans chaque cas, comme le montre l'étude DRX.

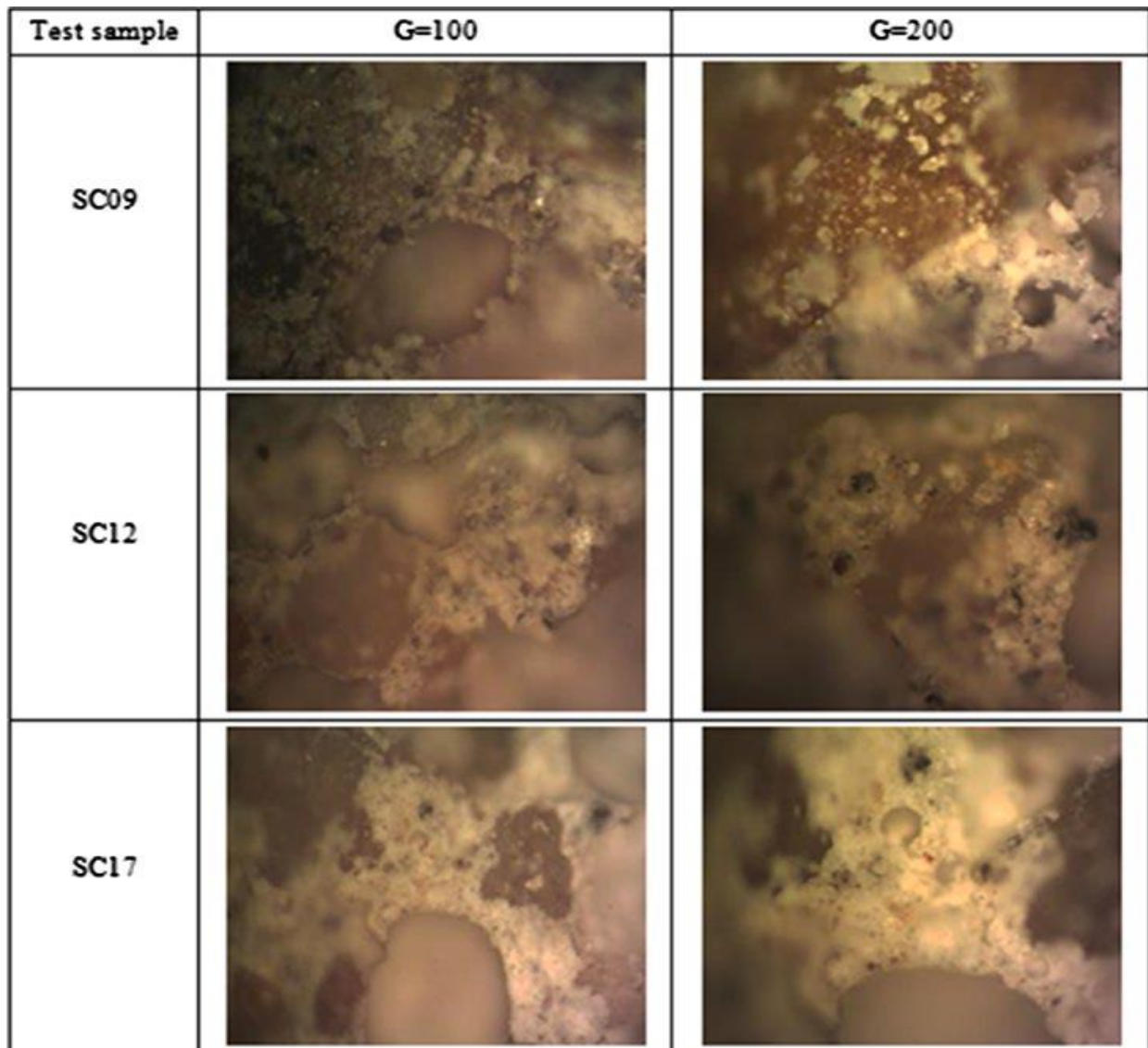


Fig. III 28. Aspect général des échantillons d'essai.

III.3.2 Cas 2 : 50% Chaux

Dans ce cas, et avec la même procédure que le cas précédent, de petits morceaux ont été extraits des différents échantillons étudiés (SC01 (50% Ch+50% Pz), (SC02 (20%Ch+80% Pz), SC17 (50% Ch+50% P), SC6 (100% Ch), SC10 (20% P + 60% Ch+20% Pz) et SC12 (40% P + 60% Pz) ; ces derniers ont été exposés aux rayons X. Dans ce cas les essais effectués à l'université de Batna ont permis d'obtenir les images illustrées par les figures III.29-35 qui montrent que les principaux produits présents dans les bétons de sable étudiés sont :

- (1) Le quartz (SiO_2) ;
- (2) Le carbonate de calcium (calcite), (CaCO_3) ;
- (3) Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;
- (4) La portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) .

Tous les diagrammes présentés par les Figures III.29 jusqu'à III.34 montrent que le quartz (SiO_2) est présent dans tous les échantillons. C'est tout à fait évident, puisque le sable utilisé pour le développement des bétons de sable étudiés est principalement composé de silice. De plus, on peut aussi constater que le pic de quartz est plus élevé lorsque la pouzzolane naturelle est présente dans le composite.

Des pics de silicates de calcium hydratés (C-S-H), dus d'une part à l'existence des ions de Ca^{2+} et de OH^- et à la présence de quartz et d'autre part, à la réaction pouzzolanique.

Plusieurs méthodes ont été avancées pour expliquer les propriétés des pouzzolanes comme étant un matériau riche en silice et en alumine capable de :

1. réagir avec la chaux en présence d'eau ;
2. former par cette réaction des produits aux propriétés liantes [48,49].

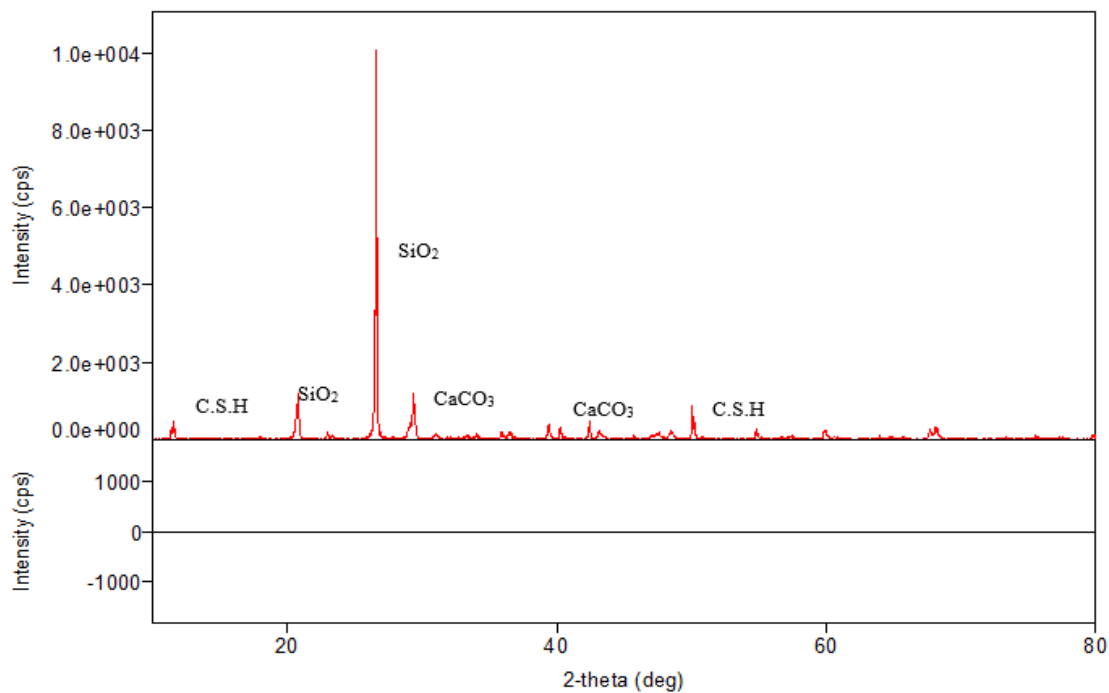


Fig. III 29. Analyse DRX de SC1 (50% Ch+50% Pz)

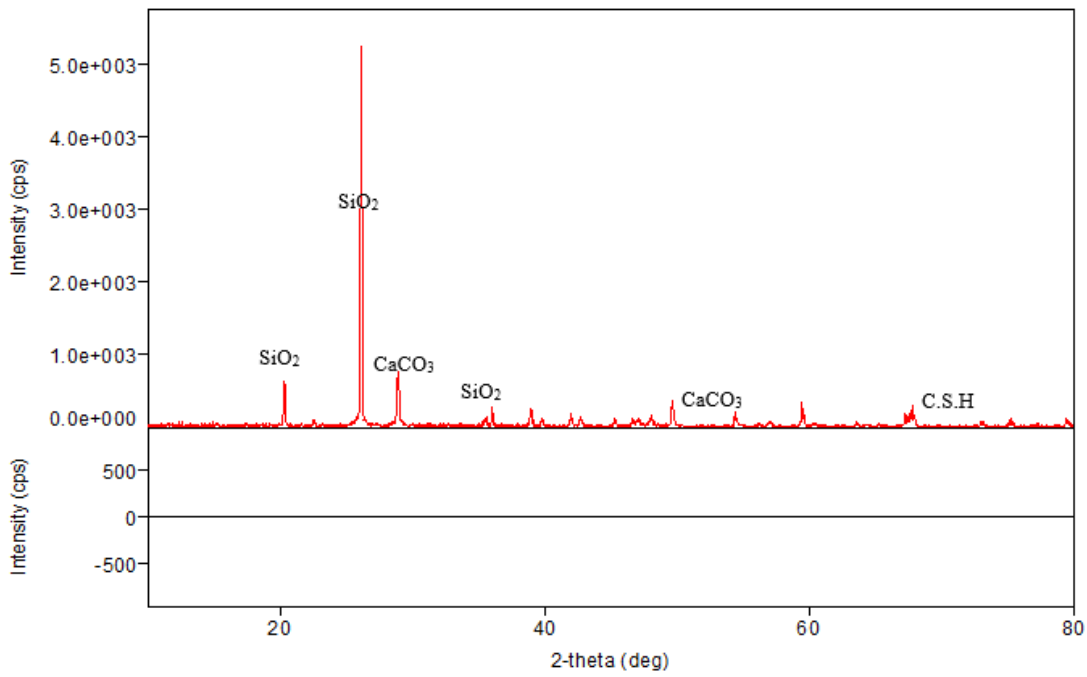


Fig. III 30. Analyse DRX de SC2 (20% Ch+80% Pz)

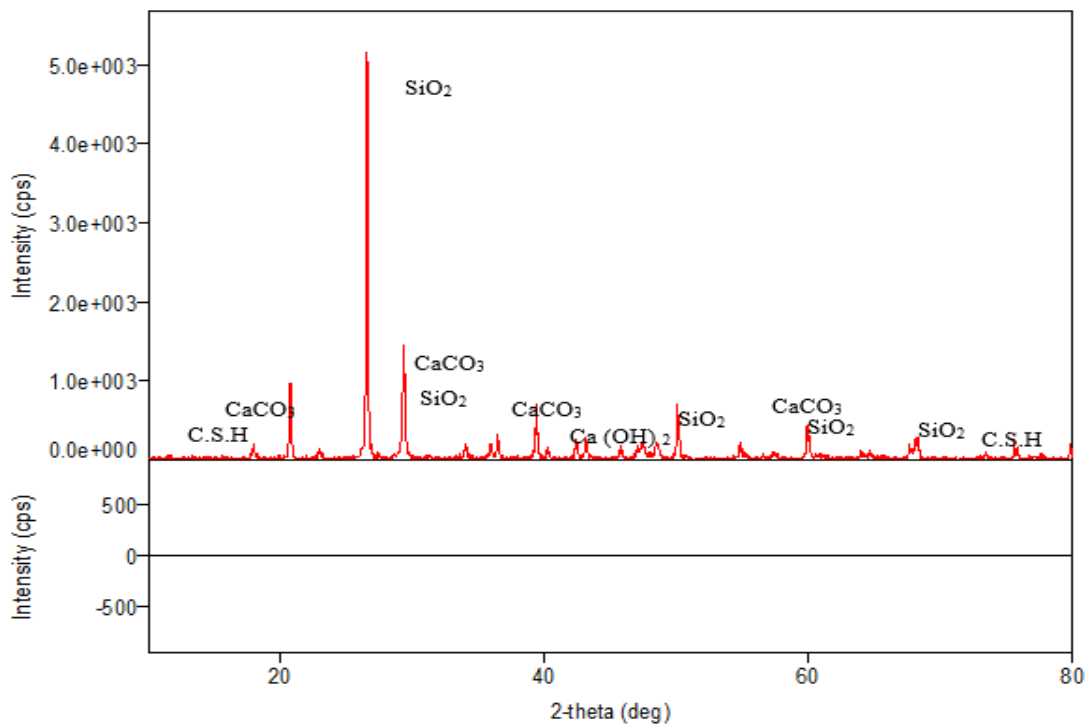


Fig. III 31. Analyse DRX de SC6 (100% Ch)

La réaction pouzzolanique de la pouzzolane se caractérise à long terme par la consommation de la chaux hydratée dans les bétons et la formation C_S_H secondaire.

D'après Belaidi [50], l'utilisation du filler calcaire avec la pouzzolane naturelle a diminué la résistance à la compression en fonction du taux de substitution et ça peut être expliqué par le fait que la résistance à la compression n'a pas augmenté de manière remarquable à long terme dans tous les bétons étudiés à l'âge de 90j ;

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :

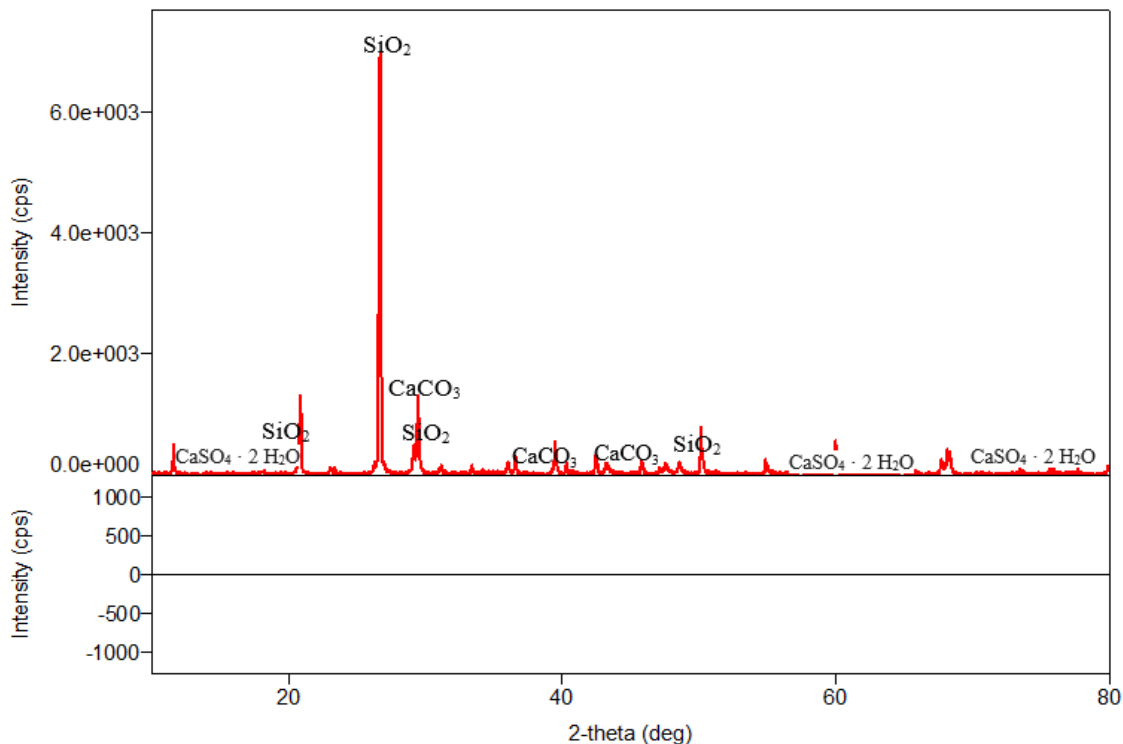
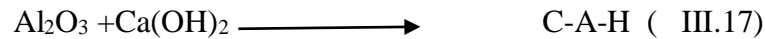
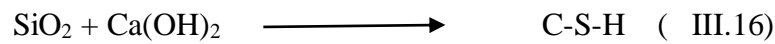


Fig. III 32. Analyse DRX de SC17 (50% Ch+50% P)

Puisque les échantillons des bétons étudiés (SC1, SC2 et SC6) sont composés de chaux, de sable et de filler calcaire, on enregistre de grands pics de calcite, où l'on note l'intensité du pic majeur pour le béton SC6 ; il est clair que ce béton présente un taux plus élevé de calcite. La présence de calcite CaCO_3 , est obtenue par dégagement de dioxyde de carbone de chaux.

On note également la présence des traces de portlandite Ca(OH)_2 dans le béton SC6 (100% Ch), cependant elles n'existent pas dans les autres bétons ce qui peut être expliqué par la consommation de la portlandite par la pouzzolane au cours de la réaction pouzzolanique.

La chaux éteinte durcit en fixant le gaz carbonique de l'air pour redonner du carbonate de calcium.

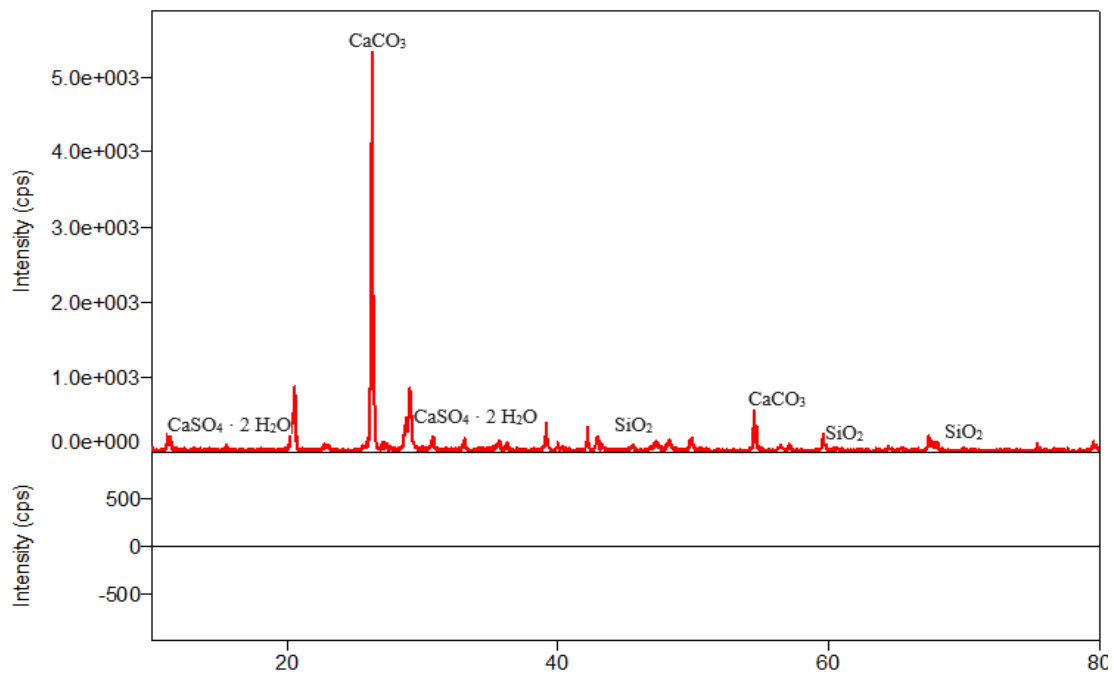
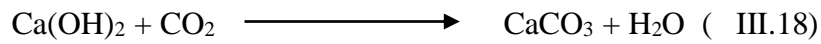


Fig. III 33. Analyse DRX de SC10 (20% P +60% Ch+20% PZ)

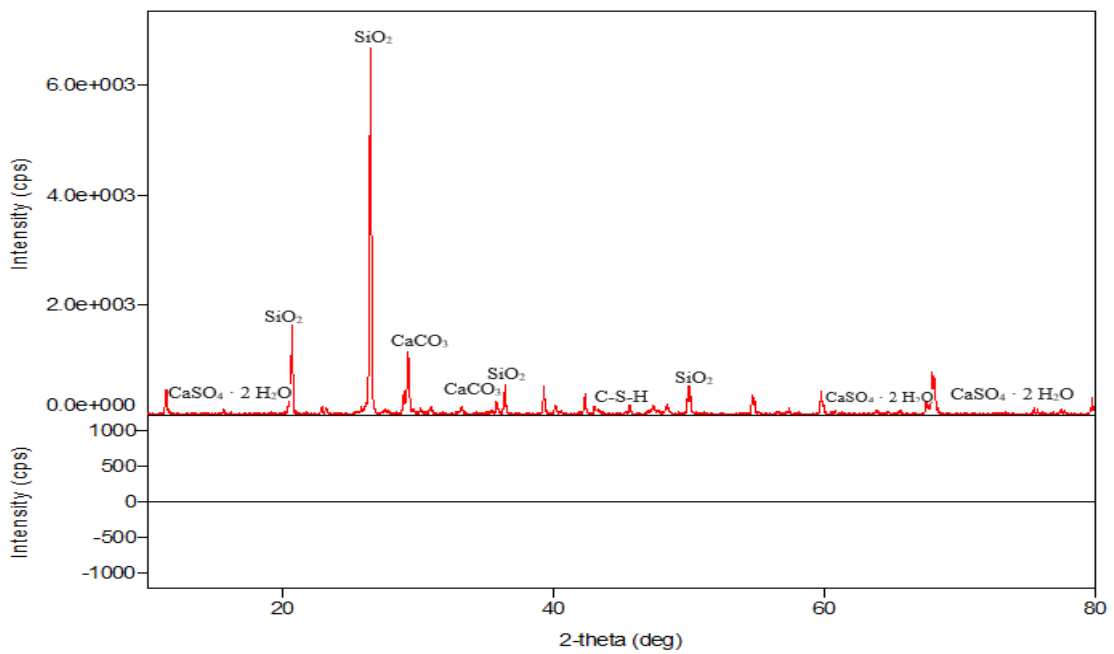


Fig. III 34. Analyse DRX de SC08 (20% P +60% Ch+20% PZ)

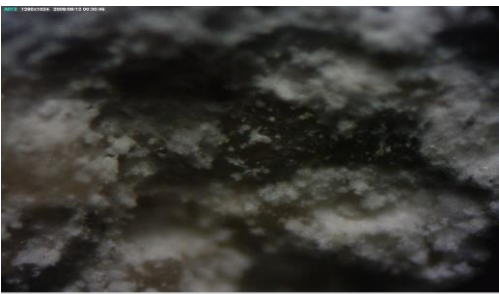

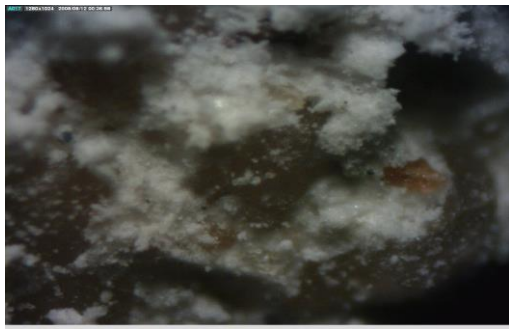


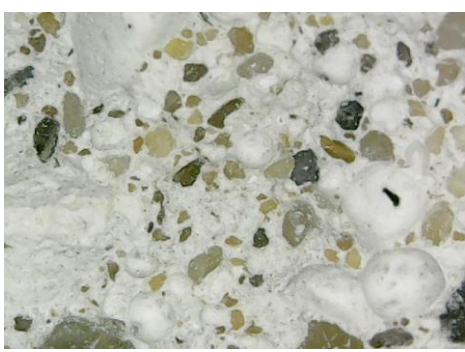


Test	G= 100	G= 40
SC1		
SC2		
SC6		
SC8		

Fig. III 35. Aspect général des échantillons d'essai.

L'observation du composite par microscopie optique peut offrir également de précieux renseignements sur l'adhérence des particules entre elles et l'homogénéité de la pâte liante, leur nature et leur structure. Le microscope optique permet de mieux observer les grains de sable et la

matrice à base des liants utilisés. La microscopie donne également une appréciation globale sur la distribution des grains de sable dans la matrice.

III.3.3 Cas 3 : 50% Plâtre

Comme précédemment mentionné, de petits morceaux ont été extraits des différents échantillons étudiés (SC01 (50% Ch+50% Pz), (SC02 (20%Ch+80% Pz), SC17 (50% Ch+50% P), SC6 (100% Ch), SC10 (20% P + 60% Ch+20% Pz) et SC12 (40% P + 60% Pz) ; ces derniers ont été soumis aux rayons X. Les figures III. 30-36 montrent que les principaux produits présents dans ces bétons sont :

- (1) le quartz (SiO_2) ;
- (2) le carbonate de calcium (calcite), (CaCO_3) ;
- (3) les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;

Les diagrammes DRX sont illustrés par les Figures III.36-39. L'analyse des échantillons élaborés avec les différents ajouts (plâtre, chaux, pouzzolane) révèle ce qui suit :

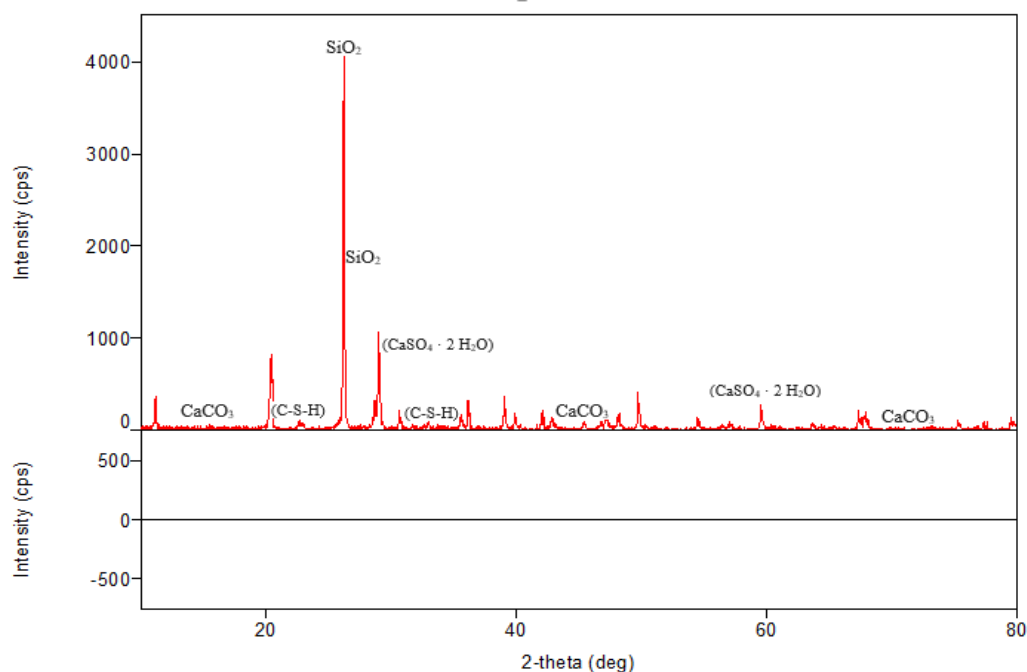


Fig. III 36. Analyse DRX de SC06 (20% P +60% Ch+20% PZ)

Du quartz (SiO_2) et de la ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ont été trouvés.

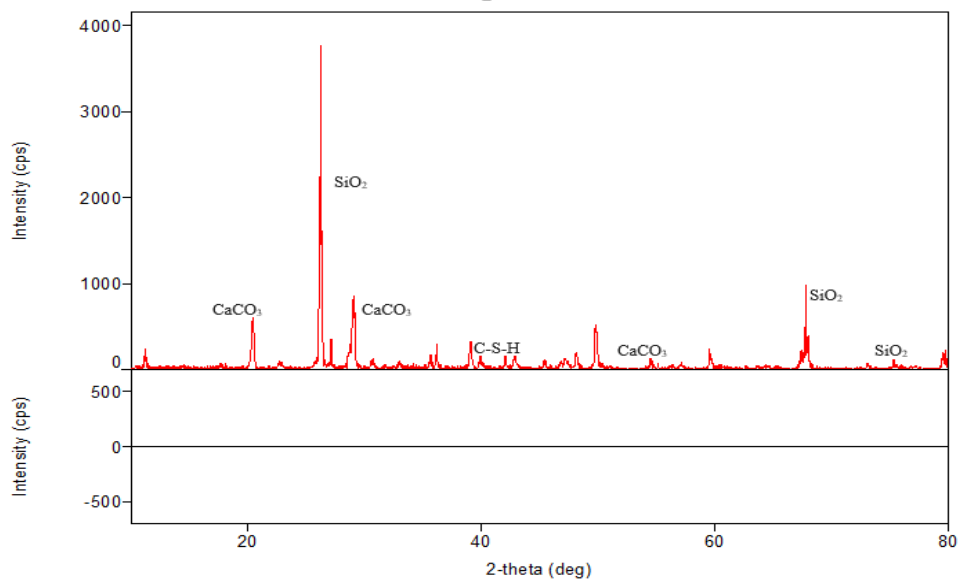
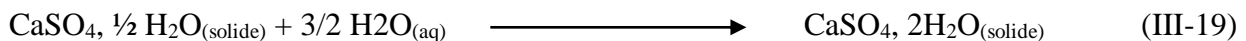


Fig. III 37. Analyse DRX de SC020 (00%P + 80% Ch+20% Pz)

Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) était fortement détecté en tant que constituant principal dans un échantillon hydraté. En général, le plâtre durci est constitué d'aiguilles enchevêtrées de cristaux de gypse obtenus par la transition de phase de sulfate de calcium (hémihydrate).

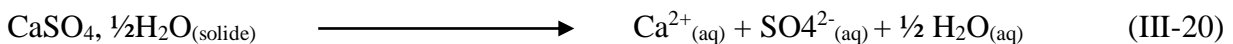
Rappelons que les premières recherches sur l'hydratation de l'hémihydrate ont été faites par Lavoisier [51] en 1768, puis par Le Chatelier [52] en 1887 qui a proposé sa célèbre théorie de la dissolution - cristallisation :

La réaction d'hydratation de l'hémihydrate correspond à la réaction inverse de la déshydratation du dihydrate (le gypse) :

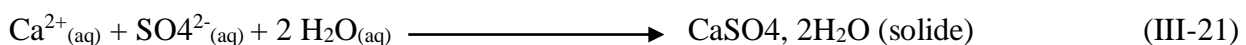


D'après Le Chatelier [52], cette transformation provient de deux mécanismes réactionnels successifs qui deviennent très rapidement simultanés:

- La dissolution de l'hémihydrate se fait comme suit:



- La précipitation du gypse :



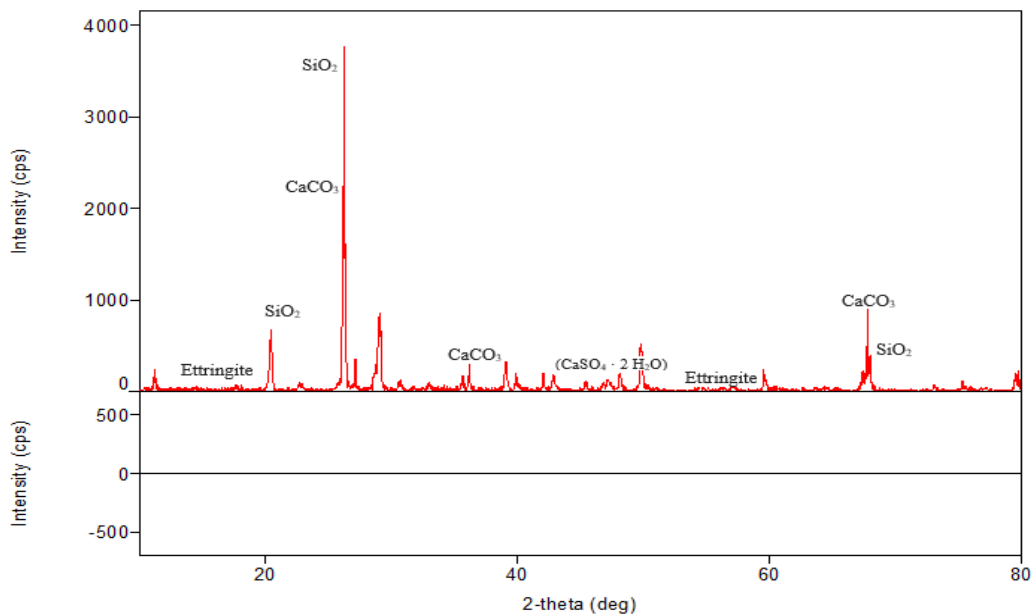
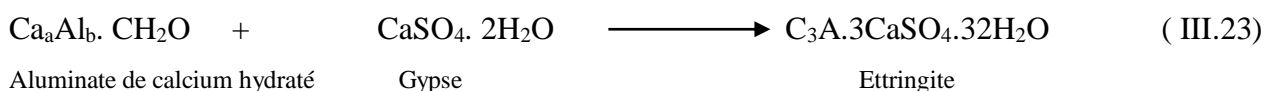
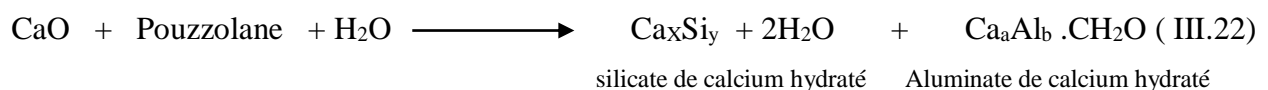


Fig. III.38. Analyse DRX de SC020 (80% P + 00% Ch + 20% Pz)

Le développement de la résistance au jeune âge est en fait la conséquence de l'hydratation du plâtre au gypse ; par ailleurs, le développement ultérieur de la résistance est dû, à la fois, à la réaction pouzzolanique de la pouzzolane et à l'hydratation de la chaux. Le silicate présent dans la pouzzolane réagit avec les ions Ca^{2+} résultant de l'hydratation de plâtre et de la chaux et forme des silicates de calcium insolubles dans l'eau.

Outre la pouzzolane, le plâtre, par addition d'eau, dégage les ions de SO_4^{2-} qui se combinent avec Al_2O_3 et CaO disponibles dans la phase aqueuse et forment de l'ettringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). L'interaction pouzzolane avec la chaux humide se fait selon la réaction suivante :



Dans les équations ci-dessus, a, b, c, x, y et z sont les variables qui sont dépendantes de la température, de la pression et des rapports molaires du réactif [53,54].

La formation des composés C-S-H, de gypse et d'ettringite, responsables du développement de la résistance.

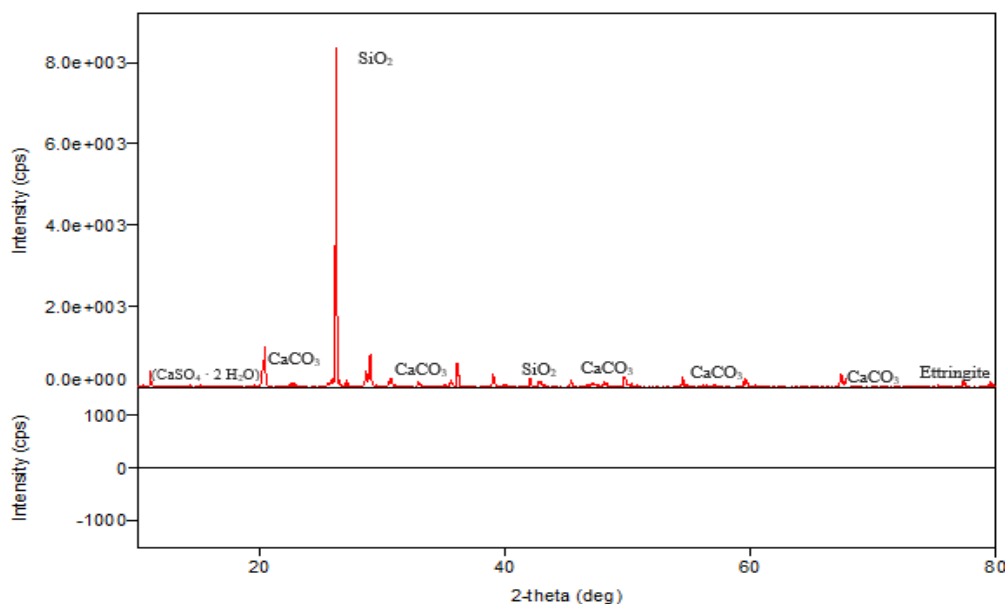


Fig. III 39. Analyse DRX de SC012 (00% P +00% Ch+100% PZ)

Il a été observé que les pics de gypse sont présents presque dans tous les échantillons, de même que les pics de CaCO_3 et de quartz,

L'intensité des pics de calcium (CaCO_3) et de quartz est très forte pour différents types de mélanges.

L'observation des C-S-H a démontré que la quantité de la chaux dans les échantillons de SC13, SC20 et SC21 a été consommée par la réaction pouzzolanique de la pouzzolane. Il apparaît que l'intensité des pics de C-S-H et d'ettringite dans les liants qui contiennent de la pouzzolane tels que les bétons SC13, SC20 et SC21 est supérieure à celle des bétons SC12.

Les liants qui contiennent de la pouzzolane sont représentés dans la Figure III. 38 et III. 39 respectivement indiquent clairement l'apparition de nouveaux pics en raison de formation d'ettringite, gypse et de C-S-H.

La formation de silicate de calcium hydraté C-S-H n'est pas visible dans le béton SC12, probablement en raison d'un chevauchement avec l'ettringite.

On note l'absence de raies de diffraction X du gypse ; il paraît qu'il a été totalement consommé pendant l'hydratation pour la formation de l'ettringite.


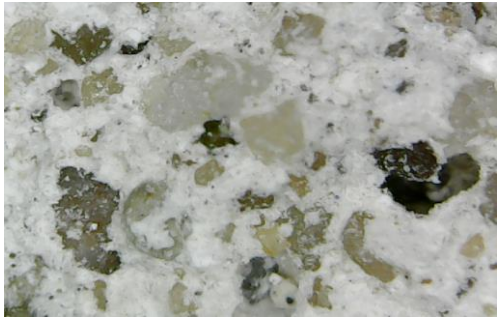






Test	G= 100	G= 40
SC20		
SC21		
SC09		
SC17		

Fig. III 40. Aspect général des échantillons d'essai.

Par ailleurs, l'observation de ce type de liant ternaire par microscopie optique montre bien la présence de différentes formes de grains de sables avec une bonne distribution de grains de tailles variées. La matrice (constitué d'un assemblage de cristaux de gypse) adhère bien aux grains de sable ; on peut dire qu'il s'agit d'une microstructure relativement homogène et compacte (micro-cristaux de gypse avec une forte densité).

III.3.4 Microstructure du béton au polymère

III.3.4.1 Mécanisme de l'hydratation

Après avoir ajouté le polymère au béton frais, les particules de polymère en suspension dans le latex sont dispersées dans la pâte de ciment.

Pendant l'hydratation du ciment, la solution est saturée en CH, ce qui conduit à la formation de cristaux d'ettringite, Et en outre une formation d'une couche de silicate de calcium sur les agrégats. En effet, les particules de ciment non hydraté sont couvertes par des particules de polymère qui se concentrent dans les pores capillaires en raison de la croissance des produits d'hydratation, étant donné que l'eau est consommée dans le processus d'hydratation, cela conduit à la formation d'une couche de silicate sur les agrégats et d'autre part, peu de pores capillaires sont remplis de particules de polymère qui recouvrent la surface interne des pores.

Les particules de polymère dans les vides se rejoignent pour former un film continu dû au retrait de l'eau par hydratation ou séchage. Ce film forme un mélange avec la pâte de ciment hydratée et relie les hydrates aux agrégats.

Peu de polymères subissent des réactions chimiques avec les produits d'hydratation du ciment [34,55].

III.4 Conclusion

Les résultats présentés dans le cadre de ce chapitre sont comme suit :

Parmi les intérêts majeurs de cette étude est la valorisation des matériaux locaux. Les résultats ont montré que les bétons formulés avec les deux sables utilisés (alluvionnaire et dunaire) ont montré l'amélioration des performances mécaniques du béton de sable.

La présence des fillers calcaires dans un sable est une nécessité.

Le béton de sable et grâce à sa petite granularité est plus léger que les bétons traditionnels.

La substitution totale au partielle du ciment dans le béton de sable peut être une solution pour améliorer certaines propriétés.

Nous avons utilisé une approche statistique basée sur les plans d'expériences.

La méthode des plans d'expériences s'est avérée très utile dans notre étude, où nous avons utilisé un plan de mélange à 3 facteurs. L'application de ce plan a conduit à la réalisation de 21 compositions pour chaque mélange.

Les outils statistiques offerts par l'application de cette méthode ont permis d'analyser les résultats trouvés avec le logiciel JMP, qui est particulièrement bien adapté pour la construction et l'analyse des plans d'expériences.

D'après les essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation de la chaux, le plâtre et le polymère au béton de sable diminue les propriétés mécaniques par rapport aux bétons de sable à base de ciment. Cette diminution peut être utile dans certaines utilisations.

La chaux et le plâtre comme liants hydrauliques donnent des résultats favorables dans certains cas.

L'ajout de l'addition minérale permet d'améliorer les caractéristiques et les propriétés mécaniques des mélanges.

La réaction pouzzolanique poursuit son développement au cours du temps, ce qui permet l'augmentation de la résistance à la compression à long terme (90 jours) pour les bétons à base de pouzzolane naturelle.

L'addition de polymère dans le ciment et dans le plâtre comme un béton modifié par un polymère donne des résultats très efficaces par rapport à celui du béton conventionnel. L'ajout de polymère améliore l'ouvrabilité et la résistance à la traction.

Après l'addition du polymère, il y a un effet de dispersion du polymère dans le ciment qui remplira les pores présents dans les vides.

D'après la littérature disponible sur le béton polymère, il a été observé que l'addition de polymère améliore la qualité du béton. Il est donc avantageux d'utiliser un polymère dans le béton. Contrairement à nos résultats que l'addition de ce type de polymère dans le béton de sable à base de ciment et à base de plâtre diminue la résistance à la compression et augmente la résistance à la traction.

L'étude expérimentale sur les compositions testées a permis de montrer que l'ajout de ce type de polymère au béton de sable, est déconseillé lorsque le but principal est la résistance,

Aucunes différences majeures de microstructure dans les trois cas étudiés n'ont pas été observées lors des analyses de microscope optique.

Les caractéristiques mécaniques du béton de sable à base de 3 liants, comparées à celles du béton de sable à base de ciment ne permettent pas leur utilisation dans les éléments structuraux. Cependant, on pourrait les utiliser comme matériau pour enfouissement de produits faiblement radioactifs ; pour les bordures de trottoirs, les éléments décoratifs, ainsi que dans la séparation de voies pour les autoroutes.

Références

- [01] Bedrina M. « Caractérisation mécanique et microstructures des bétons de sables locaux, Effet de fillers et de la nature des sables sur le comportement du matériau ». mémoire de magister, université de Laghouat .2000.
- [02] Techniques de l'ingénieur. «l'expertise technique et scientifique de référence : La chaux - Définitions et histoire ». 2009.
- [03] Goupy J, Creighton L. « Introduction to design of experiments with JMP examples ». 3rd ed. Cary, NC: SAS Institute. 2007.
- [04] Goupy J. « Plans d'expériences (design of experiments) ». MODULAD Journal ,N°34.PP 37–79,2006.
- [05] Yahia A, Khayat Kh. « Experiment design to evaluate interaction of high range water reducer and Anti washout admixture in high-performance cement grout ». Cem. Concr. Res. Vol.31, PP749–757, 2001.
- [06] Claude C J, Chassaing J P. « introduction à la méthode des Plans d'expériences Par la méthode Taguchi ». Génie électrotechnique Compléments au cours d'asservissement. C.N.E.D.
- [07] Triboulet Ph. « notions de bases sur les plans d'expériences », Lycée niepce–Chalon sur Saône .2008.
- [08] Bouziani T. « Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach ».Constr. Build.Mater.Vol.9, PP308-314, 2013.
- [09] Goupy J. « introduction aux plans d'expériences Avec applications », 5ème .Ed.2013.
- [10] Goupy J. « Plans d'expériences : les mélanges. ». ISBN 2 10 004218.1. Paris. 2000.
- [11] Arandigoyen M, Alvarez J I. « Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars ». Cem Concr Res, Vol.37, PP 767–775, 2007.
- [12] Metwally AA, Abd Elaty A, Mariam F G. « Performance of Portland cement mixes containing silica fume and mixed with lime-water ». HBRC Journal, Vol.10, PP247–257, 2014.
- [13] Grist E R, Paine K A, Heath A. « Compressive strength development of binary and ternary lime-pozzolan mortars ». Mater. Des, Vol.52,PP 514–523 ,2013.
- [14] Neville A M, Brooks J J . « Concrete Technology ». 2nd ed. Pearson education, prentice Hall ,2010.
- [15] Siad H, Khelafi H, Mouli M . « Comportements physico-mécaniques des mortiers et briques à base de liant (pouzzolane-chaux) ». Colloque Cmedimat ,(06-07) (12).2005.

- [16] Walker R, Pavía S. « Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes ». *Materials and structures*, Vol.44, PP 1139–1150, 2011.
- [17] Mosleh M S, muttar A A. « The mechanical properties of lime concrete ». *Journal of engineering and sustainable development*, Vol. 21, N°02, 2017.
- [18] Bardin F. « Le plâtre : sa production et son utilisation dans l’habitat ». groupe de recherche et d’échange technologiques.
- [19] Čáchová¹ M, Koňáková¹ D, Vejmelková¹ E, Vyšvařil M. « Ternary binder based plasters with improved thermal insulating ability ». *Materials Science and engineering*, Vol.251, 2017.
- [20] Rachedi M, Kriker A, Mokhtari A. « Contribution à l’étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier ». *Information et ressources scientifique sur le développement des zones arides et semi arides*, université kasdi merbah, Ouargla.2017.
- [21] Edgar A, Pachon R. « Etude de l’influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides – fluage du plâtre ». Thèse doctorat, Université Claude bernard, Lyon I.2011.
- [22] Kriker A. « Caractérisation des Fibres de Palmier Dattier et Propriétés des Bétons et Mortiers Renforcés par ces Fibres en Climat Chaud et Sec ». Thèse de doctorat, ENP, Alger.2005.
- [23] Fabien B E. « Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales ». Thèse en cotutelle , université blaise bascal, clermont-ferrand II. 2012.
- [24] Benali M, Soussi Ch, Benjeddou O. « Etude expérimentale de la formulation d’un mortier à base de plâtre et de sable pour la fabrication d’un nouveau bloc de brique » *Journées nationales du béton*, hammamet. (5-7) (05) .2017.
- [25] Kuryatnyk T. «Thèse Insensibilisation à l’eau des mélanges à base de sulfate de calcium par ajout de clinker sulfo-alumineux». Ecole doctorale MEGA .2007.
- [26] Abidi M L, Lamdouar N, Iraqi L, Abdelaali H M, Alaoui A. «Etude d’un liant à base de plâtre et de clinker sulfoalumineux » *EDP Sciences. International congress on materials et structural stability*, rabat, Maroc. 2013.
- [27] YUQ I, Brouwers H J H « Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite ». *Cement et concrete composites*, Vol.34, PP 1033–1043, 2012.

- [28] YU Q I, Brouwers H J H « Microstructure and mechanical properties of b-hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process ». *Construction and building materials*, Vol.25, PP3149–3157, 2011.
- [29] Martiniez Gabarron A, Flores Yepes J A, Pastor Pérez J J, Berná Serna J M, Arnold L C, Sánchez Medrano F J . « Increase of the flexural strength of construction elements made with plaster (calcium sulfate dihydrate) and common reed (*Arundo donax L*) ». *Construction and Building Materials*, Vol.66, PP436–441, 2014.
- [30] Coquard P. « Résistance mécanique des plâtres secs et humides ». Thèse de doctorat, université d'aix-marseille III, france. 1992.
- [31] Meille S. « Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure ». Thèse de doctorat, INSA de Lyon. 2001.
- [32] Pachon-Rodriguez E. « Étude de l'influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides : fluage du plâtre ». Thèse de doctorat, université de Lyon.2011
- [33] Denbrok S.W.J. « Effect of microcracking on pressure-solution strain rate: The gratz grain-boundary model». *Geology*, Vol.26, PP915–918, 1998.
- [34] .Hirde S K, Omprakash S. « Dudhal review on polymer modified concrete and its application to concrete structures». *International journal of engineering research*, Vol.5, N°3, PP766-769, 2016.
- [35] « Fiche technique tek weld résine synthétique d'adhérence et multi usages » .TEKNACHEM, algérie sarl. (01).2016.
- [36] Bonin K. «The function of polymer dispersion powder in cement based dry mix products ». Wacker Polymer Systems.2005.
- [37] Gemert D V, Knapen E. « Recent Development of Concrete Polymer in Belgium ». 11th ICPIG Congress in Berlin. 2004.
- [38] Belkhodja A. « Etude des interactions ciment – polymères dans un Matériau de construction ». Mémoire de magister, université Abou-Bekr Belkaid , Tlemcen. 2013.
- [39] Boutti S, Urvoy M, Dubois-Brugger I, Graillat C, Bourgeat-Lami E, Spitz R. « Influence of low fractions of styrene/butyl acrylate polymer latexes on some properties of ordinary Portland cement mortars». *Macromolecular Materials and Engineering*, vol.292, N°01, PP 33-45,2007.
- [40] Goto T. « Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex ». *Sciences de l'ingénieur*, université Pierre et Marie Curie , Paris VI . 2006.

- [41] Latroch N, Belbachir B, Benosman A S, Taibi H, Ayed K, Mouli M. « Matériaux Composites Mortier-Polymère à Bases des Additions Minérales : Durabilité dans un Environnement à Tendance Acide ». 33èmes rencontres de l'AUGC, Anglet , (27-29) (05).2015.
- [42] Çavdar A, Sevin S, Kaya Y, Bingöl S. « The Effects of Cure Conditions on Mechanical Properties of Polymer Modified Cement Mortars ». Balkan Journal of electrical et computer engineering, Vol.2, N°2, 2014.
- [43] Sebaibi Y, Dheilily R M, Beaudoin B. « The effect of various slaked limes on the microstructure of a lime–cement–sand mortar ». Cem Concr Res, Vol.36, PP971–978, 2006.
- [44] Senhadji Y, Escadeillas G, Khelafi H. « Evaluation of natural pozzolan for use as supplementary cementitious material ». European Journal of environmental and civil engineering Vol.16, N°1, PP77–96, 2012.
- [45] Makhloufi Z, Kadri E H, Bouhicha M. « Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution ». Constr. Build. Mater. Vol.26, PP 497–504, 2012.
- [46] Bederina M, Makhloufi Z, Bounoua A. « Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions ». Constr. Build. Mater, 2013.
- [47] Lorca P, Calabuig R, Benlloch J. « Microconcrete with partial replacement of Portland Cement by fly ash and hydrated lime addition ». Mater. Des, Vol.64, PP 535–541, 2014.
- [48] Barret P, Menetrier D, Cottin B. « Study of Silicate-Lime Solution Reaction ». Cement and concrete research, Vol.7, N°01, PP 61 -67, 1977.
- [49] Massazza F. « Chemistry of Pozzolanic Additions and Mixed Cements ». Cemento, Vol.1, N°73, PP 3-38, 1976.
- [50] Belaidi A S D. « Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : Apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels ». Thèse de doctorat, Blida. 2013.
- [51] Lavoisier A. « Mémoire Math Phys ». P341, 1768.
- [52] Chatelier H. « Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers ». Compt. Rend 96, Paris .P715, 1883.
- [53] Yang M, Qian J, Pang Y. « Activation of fly ash–lime systems using calcined phosphogypsum ». Constr Build Mater , Vol.22, PP1004-1008, 2008.

- [54] Garg M, Pundir A. « Comprehensive study of fly ash binder developed with fly ash – alpha gypsum plaster–Portland cement ». *Construction and Building Materials*, Vol.37, PP758–765,2012.
- [55] Kardon JB. « Polymer-Modified Concrete: Review ». *Journal of materials in civil engineering*, Vol.9, N°2, PP 85-92,1997.
- [56] Geist J M, Amagna S V, Mellor B B. « Improved Portland Cement Mortars with Polyvinyl Acetate Emulsions ». *Journal of Industrial and Engineering chemistry*, Vol.45, PP759-767, 1953.

Conclusions générales

Le ciment est, pour le moment, le liant le plus utilisé de par sa disponibilité partout dans le monde. Bien que les cimentiers ne cessent de chercher de plus en plus de nouveaux adjuvants qui donnent des résultats meilleurs, certains problèmes persistent toujours.

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour but une étude théorique et pratique qui vise à mieux comprendre l'action des ajouts sur la matrice cimentaire d'un béton de sable, afin de développer de nouveaux matériaux ayant des propriétés intéressantes.

Par ailleurs, les bétons de sable semblent être la solution la plus efficace qui pourrait faire face au problème de la non disponibilité des ressources en gros granulats dans certaines régions. La disponibilité des sables de dune en abondance, notamment dans les régions du sud de l'Algérie, pourrait encourager davantage cette solution. En effet, grâce à ses propriétés spécifiques, le béton de sable constitue un atout important, en comparaison avec les bétons traditionnels, pour l'amélioration de certaines performances et la résolution de certains problèmes techniques.

La substitution totale ou partielle du ciment dans le béton de sable pourrait également constituer une autre solution pour améliorer certaines propriétés.

Afin d'éviter une étude préliminaire, qui ne représente qu'une démarche classique longue pour la recherche de la composition des BS, nous avons utilisé une approche statistique basée sur les plans d'expériences. La méthode des plans d'expériences s'est avérée très utile dans notre cas, où nous avons utilisé un plan de mélange à 3 facteurs. L'application de ce plan a conduit à la réalisation de 21 compositions.

Les outils statistiques offerts par l'application de cette méthode ont permis d'analyser les résultats trouvés. De plus, avec le logiciel « JMP », qui est particulièrement bien adapté pour la construction et l'analyse des plans d'expériences, nous avons pu analyser et interpréter les résultats trouvés dans notre travail et d'établir des équations ainsi que des graphes d'influence des facteurs envisagés et de leurs interactions possibles sur les réponses qui sont la résistance mécanique à la compression à 7, 28 et 90 jours.

Les techniques expérimentales, de plus en plus sophistiquées, permettront dans un proche futur, peut-être, de mieux cerner l'étude de ce matériau qui résignera pour longtemps le domaine du génie civil.

En général, l'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'effet de la substitution totale et partielle du Ciment avec la chaux (Ch), le plâtre (P), la pouzzolane (Pz) et le polymère (Pol) sur les propriétés mécaniques des bétons de sable. A partir de cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions intéressantes. Parmi celles-ci, on peut citer :

Pour le cas du béton de sable à liant unique :

- **Cas de ciment :**

Le béton de sable à base de ciment étudié, (béton de référence), est un béton plus compact, plus maniable et nécessitant moins de filler avec une résistance en compression qui dépasse 25MPa. Ce résultat est très intéressant, surtout dans notre région où les immeubles ne nécessitent pas une grande valeur de résistance, grâce au nombre d'étages limité.

À partir de ces résultats, nous pouvons dire que l'utilisation de béton de sable à base de ciment dans les éléments structuraux doit être encouragée, en particulier dans les bâtiments individuels, afin de réduire l'utilisation excessive des gros granulats, d'encourager l'exploitation des sables disponibles en grandes quantités dans notre région et de préserver l'économie de l'individu et de l'État.

- **Cas de la chaux :**

La résistance à la compression à 7 et 28 jours, est très faible par rapport au béton de sable à base de ciment.

Pour ce type de béton à base de la chaux la résistance à la compression a atteint la valeur 2.45MPa.

La résistance à la compression et à la traction augmente avec le temps, surtout pour l'échéance entre 28 et 90 jours.

La réaction pouzzolanique poursuit son développement au cours du temps, ce qui a permis l'augmentation de la résistance à la compression à long terme (90 jours).

Malheureusement, l'effet de la substitution totale du ciment par la chaux est très faible du point de vu résistance. Mais, ce résultat nous permet de voir effectivement l'intérêt bénéfique de ce type de matériaux sur le plan économique, technique et écologique surtout dans le domaine de restauration de monuments historiques, tels que les mosquées, les vieux palais, les coins, qui sont essentiellement construits avec ces matériaux naturels, pour préserver le même aspect et la même forme de ces monuments.

- **Cas du plâtre :**

La résistance à la compression à 7 et 28 jours, est très faible par rapport au béton de sable à base de ciment et est généralement plus importante que celle du béton à base de chaux.

Pour ce type de béton à base de plâtre, la résistance à la compression a atteint la valeur de 7.37MPa.

La résistance à la compression et à la traction diminue avec le temps, surtout pour l'échéance entre 28 et 90 jours.

Certes, une résistance de 7 MPa atteinte dans les 28 jours dans le cas du plâtre et de 2.45MPa dans le cas de la chaux est relativement faible, mais n'oublions jamais que certaines utilisations nécessitent des valeurs de résistances très réduites. (Mortier pour maçonnerie, mortier pour enduits, mortier de pose, mortier pour chapes, mortier de jointoiement).

Pour le cas du béton de sable à liant substitué

- **Cas 50% Ciment :**

Le béton de sable SC09 (100% C) a présenté les meilleures résistances, en compression et en flexion avec une économie de ciment de 20%, le SC08 (80% C+20% Ch) et le SC13 (80% C+20% Pz) présentent relativement une bonne valeur de résistance mécanique.

Un taux élevé de chaux a engendré une influence négative sur la résistance mécanique (50% Ch) (la valeur minimale de résistance est enregistrée dans le cas de SC17 (100% Ch)).

Par ailleurs, la pouzzolane est la plus avantageuse pour la résistance mécanique. La réaction pouzzolanique poursuit son développement au cours du temps, ce qui a permis l'augmentation de la résistance à la compression à long terme (90 jours) pour les bétons à base de pouzzolane naturelle. Plusieurs études ont montré que la pouzzolane naturelle a été employée couramment comme produit de substitution du ciment Portland pour ses propriétés avantageuses qui incluent la réduction du coût, la réduction de l'évolution de la chaleur, la diminution de la perméabilité et l'augmentation de la résistance chimique.

L'augmentation des teneurs en pouzzolane provoque la diminution de la résistance à la compression (BSC12 (100% Pz)); en d'autres termes, le remplacement partiel du ciment Portland par la pouzzolane réduit la compacité du ciment et réduit donc sa résistance mécanique.

- **Cas 50% Chaux :**

Selon les résultats expérimentaux, l'introduction simultanée du plâtre et de la pouzzolane dans le béton à base de chaux conduit à un nouveau liant à base de plâtre très intéressant qui donne des résultats remarquables.

Le remplacement partiel de la chaux par le plâtre augmente la résistance mécanique jusqu' à 50%. (La résistance à la compression atteint une valeur maximale (la meilleure résistance) dans le cas de 50% de chaux et 50% de plâtre (SC21)).

A cause du pourcentage élevé de chaux hydratée, la résistance à la compression du béton de sable témoin à 100% chaux (SC06) est très faible par rapport au celle des autres types des bétons étudiés.

Grace à la réaction pouzzolanique entre la pouzzolane et la chaux, la résistance à la compression et à la traction, augmente avec le temps, surtout pour l'échéance entre 28 et 90 jours.

Dans ce cas, un taux élevé de chaux a engendré une influence négative sur la résistance mécanique tandis que la pouzzolane est la plus avantageuse pour la résistance mécanique (En comparant SC06 (100% Ch) et SC01 (100% Pz).

La valorisation de la pouzzolane et du plâtre peut donc être bénéfique, tant dans le cadre économique, que dans le cadre environnemental. L'ajout de ces deux matériaux donne des avantages et améliore les caractéristiques mécaniques des bétons.

- **Cas 3 : 50% plâtre :**

La résistance à la compression atteint une valeur maximale dans le cas de 100% de plâtre avec une augmentation de résistance d'environ 67% par rapport à SC06 (100% Ch), et une augmentation de résistance d'environ 31% par rapport à SC06 (50% Ch +50% P).

La réaction pouzzolanique entre la pouzzolane et la chaux est très lente, alors que, la résistance mécanique se développe de manière très lente après 28 jours.

Selon les résultats obtenus pour les propriétés physiques et mécaniques des différents mélanges, on a montré que le sable provoque une diminution de la résistance à la compression du plâtre.

Comme pour la chaux, ces résultats sont encourageants pour une éventuelle utilisation de ce type de liants dans la restauration des bâtiments anciens et historiques pour la conservation de notre patrimoine, surtout dans notre région où les anciennes infrastructures à base des matériaux locaux.

- **Cas 4 : 20% Polymère :**

Ce type de résine a diminué les résistances à la compression des bétons étudiés. Cependant, ce type de résine a amélioré les résistances à la traction de ces bétons ; on a remarqué que les résistances mécaniques, notamment à la traction, des bétons résineux sont nettement supérieures à celles des bétons de sable cimentaires ou à base de plâtre.

Un taux élevé de polymère a engendré une influence négative sur la résistance mécanique.

Pour un taux élevé de polymère (20%), on a noté une chute de résistance mécanique d'environ 60 % par rapport à SC9 (100% de Ciment) et d'environ 60 % par rapport à SC12 (100% de Plâtre).

L'interaction latex / (ciment ou plâtre) semblent influencer sur l'évolution du degré d'hydratation. Nous avons, en effet, observé pour ce type de latex, une modification de la cinétique d'hydratation du ciment et de plâtre en présence de latex.

Enfin, il convient de signaler que les résultats présentés dans le cadre de notre thèse sur des bétons spéciaux (bétons de sable) sont obtenus en valorisant des matériaux locaux disponibles dans les régions sud de l'Algérie (sables alluvionnaire et dunaire). Dans ce contexte, différents liants ont été utilisés et étudiés. Les résultats ainsi obtenus sont encourageants mais, quand même, d'autres études seront bien sûr intéressantes pour confirmer ces résultats ou élargir la base de données sur ces nouveaux types de bétons.

Comme perspectives,

- une étude sur l'effet de chargement de ce type de matériaux par une proportion de gros granulats sera très intéressante.
- Il sera également intéressant d'utiliser d'autres types de polymères (en poudre, résines époxy, etc.), en systèmes binaire et ternaire, pour voir l'influence du type de polymère sur les propriétés du béton de sable (comportement mécanique, microstructure et durabilité, etc.) afin de confirmer la faisabilité de ce type de béton dans le domaine de construction.
- Il serait aussi intéressant d'étudier l'applicabilité de nouvelles approches statistiques pour optimiser la formulation d'autres bétons, ainsi que de continuer l'étude de la durabilité des bétons de sable à base de ces liants.



Chapitre I
Eude bibliographique

Chapitre II
Caractéristiques des Matériaux
et Techniques Expérimentales
Utilisées



Chapitre III
Résultats et discussions



Conclusion générale



Introduction générale
