

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE CIVIL



FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : MATERIAUX DE GENIE CIVIL

N° : .....

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par : Belkadi Aissa & Daoud Said**

**Intitulé**

**Étude corrélative de l'effet combiné de  
l'activation chimique et la nature du sable sur les  
propriétés physico-mécaniques d'un mortier.**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. SEDDIKI Ahmed	Université de M'sila	Président
Dr. MAZA Mekki	Université de M'sila	Examineur
Dr. BELAGRAA Larbi	Université de M'sila	Encadreur
Dr. LADJEL Djeloul	Université de M'sila	Co-encadreur







**Année universitaire : 2020 /2021**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

-  *A mon cher père et ma chère mère.*
-  *A ma femme.*
-  *A mes chers enfants razane et taha fakhedinne.*
-  *A mes chers frères et sœurs.*
-  *A toute ma famille.*
-  *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout Puissant et le Miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail de mémoire.

« **Ne remercie pas Dieu celui qui ne remercie pas les gens** »

Je remercie à mon encadreur de mémoire Mr. BELAGRAA Larbi enseignant à l'université de M'sila Pour qu'il guider sur le bon chemin et ma reconnaissance pour la gentillesse, la disponibilité, sa vaste culture, ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail et de m'avoir accompagné toujours avec un mot d'encouragement positif et optimiste dans le domaine et avec un sujet extrêmement intéressant et original

Je tiens exprimer mon plus vif remerciement et ma reconnaissance à Mr Ladjel djalloul, Dr à l'université de M'sila Co-encadreur de ma mémoire pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa vaste culture et ses précieux conseils qu'il m'a offert pour permettre d'élaborer ce travail malgré ses occupations.


Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tout le personnel des laboratoires de la cimenterie de Hammam Dalâa "LAFARGE".

Je remercie à tous les personnes de cosider ouvrages d'art POLE A15 M'SILA surtout l'ingénieur CHENNI Aissam.

J'adresse mes remerciements aussi à tous les membres des laboratoires de génie civil de L'université de M'sila.

J'exprime enfin, mes remerciements chaleureux à ma famille et tout particulièrement à **ma mère**, à mes frères, à mes sœurs à **ma femme** sans oublie mes chers enfants razane et taha fakherdinne pour leur soutien et leur patience pendant toute cette période de mémoire.

Très chaleureusement tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.



# Table des Matières

Liste des figures	I
Liste des Tableaux	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Introduction Générale	1

## CHAPITRE I : CIMENT

I Le ciment	03
I.1 Définition et généralités	03
I.2 Types de ciment	03
I.2.1 Classification des ciments en fonction de leur composition	03
I.2.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance	04
I.3 Composition d'un ciment portland	04
I.3.1 Silicate tricalcique (C3S)	06
I.3.2 Silicate bi calcique (C2S)	06
I.3.3 Aluminate tricalcique (C3A)	06
I.3.4 Aliminoferrite tétracalcique (C4AF)	06
I.3.5 Les composés mineurs	07
I.4 Hydratation du ciment	08
I.4.1 Hydratation du C3S et du C2S	08
I.4.2 Hydratation de C3A	09
I.4.3 Hydratation de C4AF	10
I.4.4 Hydratation en présence des additions minérales	10
I.5 Le phénomène de prise	10
II.5 Conclusion	10

## CHAPITRE II : MODES D'ACTIVATION DES CIMENTS

II.1. Introduction	11
II.2 Méthodes d'activation du ciment	11
II.3 Différentes méthodes d'activation	12
II.3.1 Activation chimique	12
II.3.1.1 Activation par les alcalis caustiques	12
II.3.1.2 L'activation sulfatique (gypse et plâtre)	12
II.3.2 Activation mécanique	12
II.3.3 Activation thermique	13

II.4 Comparaison entre les différents types d'activation .....	14
II.5 Conclusion.....	14

### **CHAPITRE III** : Méthodes plan d'expérience

III.1 Définition.....	15
III.2 Domaine expérimental.....	16
III.3 Méthodologique d'un plan d'expériences.....	17
III.4 Types de plan d'expériences .....	17
III.4.1 Plans factoriels complets .....	17
III.4.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux.....	18
III.4.1.2 Plans factoriels à N niveaux et P paramètres.....	18
III.4.2 Plans fractionnaires .....	18
III.4.2.1 Plans fractionnaires à deux niveaux .....	18
III.4.2.1 Plan fractionnaire à N niveaux et P paramètres.....	18
III.5 Méthode des surfaces de repose.....	19
III.6 Analyse des résultats.....	19
III.6.1 Analyse de régression.....	19
III.6.2 Analyse de la variance.....	20
III.7 Conclusion.....	20

### **CHAPITRE IV** : Protocol expérimental

IV. Protocol expérimental.....	21
IV.1 Ciments .....	21
IV.1.1 Analyse chimique des ciments.....	21
IV.1.2 Analyse physico-mécanique de ciment.....	21
IV.2 Activant.....	22
IV.3 Sable .....	23
IV.3.1. Analyse granulométrique .....	23
IV.3.2. Les caractéristiques physiques des sables.....	23
IV.4. L'eau de gâchage.....	24
IV.5 La confection de mortier.....	24
IV.5.1 Préparation des mélanges.....	24
IV.5.1.1 Activation chimique.....	24

IV.5.2 Malaxage de mortier .....	25
IV.5.3 Fabrication des éprouvettes.....	26
IV.5.4 Conservation des éprouvettes .....	27
IV.5.5 Essais sur mortiers .....	28
IV.5.5.1 Essai de consistance .....	28
IV.5.5.2 Essais de prise .....	28
IV.5.5.3 Les essais sur le mortier durci .....	30
IV.5.5.3.1. Les essais de la résistance mécanique .....	30
IV.5.5.3.2 La résistance à la flexion .....	30
IV.5.5.3.3 La résistance à la compression .....	32
IV.6 Conclusion.....	33

## **CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION**

V.1 Effet de type de sable :.....	34
V.1.1 La résistance à la compression.....	34
V.1.2 La résistance à la flexion.....	35
V.2 Etude Corrélative (Méthode JMP) .....	36
V.2.1 Modélisation de comportement mécanique pour les ciments active chimiquement ....	36
V.2.1.1 Effet de NaOH .....	36
V.2.1.1.1 Matrice d'expérience.....	36
V.2.1.1.2 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours .....	39
V.2.1.1.3 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours.....	41
V.2.1.1.4 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours.....	43
V.2.1.1.5 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours.....	45
V.2.1.2 Effet de KOH.....	47
V.2.1.2.1 Matrice d'expérience.....	47
V.2.1.2.2 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours.....	48
V.2.1.2.3 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs	51

observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours.....	
V.2.1.2.4 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours.....	53
V.2.1.2.5 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours.....	55
V.3 Étude de corrélation (Méthode EXCEL) .....	57
V.3.1 Effet de NaOH.....	57
V.3.1.1 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs%) pour MSN.....	57
V.3.1.2 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs%) pour MSN.....	58
V.3.1.3 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs%) pour MSD.....	58
V.3.1.4 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs%) pour MSD.....	59
V.3.1.5 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN.....	59
V.3.1.6 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD.....	60
V.3.2 Effet de KOH.....	60
V.3.2.1Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs%) pour MSN.....	60
V.3.2.2Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs%) pour MSN.....	61
V.3.2.3Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs%) pour MSD.....	61
V.3.2.4Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs%) pour MSD.....	62
V.3.2.5Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN.....	62
V.3.2.6Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD.....	63
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>64</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>66</b>
<b>Annexe</b>	

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure I.1 Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage  $G = \times 1010$  .....8

Figure I.2 Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage .....9

## Chapitre II

Figure II.1 Les différentes méthodes d'activation selon..... 11

## Chapitre III

Figure III.1 Domaine d'étude d'un plan  $2^2$  ..... 16

Figure III.2 Domaine d'étude d'un plan  $2^3$  ..... 16

## Chapitre IV

Figure IV.1 L'hydroxyde de sodium et l'hydroxyde de potassium (NaOH, KOH) .....22

Figure IV.2 Eprouvette prismatique 4x4x16 (Laboratoire de lafargeholcim M'sila) .....26

Figure IV.3 Malaxeur semi-automatique de mortier (Laboratoire de lafargeholcim M'sila) .....26

Figure IV.4 Table vibrante automatique (Laboratoire de lafargeholcim M'sila) .....26

Figure IV.5 Plaque de protégé (Laboratoire de lafargeholcim M'sila) .....26

Figure IV.6 La Chambre d'humidité 20°C(Laboratoire de lafargeholcim M'sila).....27

Figure IV.7 Conservation des éprouvettes dans l'eau. (20 °C  $\pm$ 1).....27

Figure IV.8 L'appareil de Vicat.....28

Figure IV.9 L'appareil de Vicat automatique .....29

Figure IV.10 Consistances normales, temps de prise de ciment activant chimique .....29

Figure IV.11 Appareil automatique de compression et de flexion des mortiers .....30

Figure IV.12 Principe de la flexion sur prisme. ....30

Figure IV.13 Essai de flexion .....31

Figure IV.14 Le principe de l'essai à la compression du mortier. ....32

Figure IV.15 Eprouvette testée en compression .....32

## Chapitre V

Figure V.1 L'évolution de la résistance à la compression en fonction de type d'activant sable de oued souf .....34

Figure V.2 L'évolution de la résistance à la compression en fonction de type d'activant sable de normalisée...34

Figure V.3 L'évolution de la résistance à la flexion en fonction de type d'activant sable de oued souf.35

Figure V.4 L'évolution de la résistance à la flexion en fonction de type d'activant sable normalisée . .36

Figure V.5 Evolution de la résistance en compression à (2,14 et 28 jours) .....37

Figure V.6 Evolution de la résistance en flexion à (2,14 et 28 jours).....38

Figure V.7 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues .....39

Figure V.8 L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable. ....	40
Figure V.9 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	41
Figure V.10 L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable..	42
Figure V.11 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	43
Figure V.12 L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable. ....	44
Figure V.13 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	45
Figure V.14 L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable..	46
Figure V.15 Evolution de la résistance en compression à (2,14 et 28 jours).....	47
Figure V.16 Evolution de la résistance en flexion à (2,14 et 28 jours) .....	48
Figure V.17 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues .....	49
Figure V.18 L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable.....	50
Figure V.19 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues .....	51
Figure V.20 L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable .....	52
Figure V.21 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues .....	53
Figure V.22 L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable.....	55
Figure V.23 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	55
Figure V.24 L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable .....	57
Figure V.25 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSN .....	57
Figure V.26 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSN.....	58
Figure V.27 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSD .....	58
Figure V.28 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSD.....	59
Figure V.29 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN .....	59
Figure V.30 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD.....	60
Figure V.31 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSN .....	60
Figure V.32 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSN . ....	61
Figure V.33 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSD.....	61
Figure V.34 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSD. ....	62
Figure V.35 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN .....	62
Figure V.36 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD. ....	63

# Liste des Tableaux

## Chapitre I

Tableaux I.1 Définition des classes de résistance .....	4
Tableaux I.2 Composition chimique du clinker de ciment Portland ordinaire .....	5
Tableaux I.3 Principaux constituants du ciment Portland et leurs caractéristiques .....	7

## Chapitre IV

Tableaux IV.1 Type ciment utilisé CEM I 42,5 N SR3 .....	21
Tableaux IV.2 Composition chimique du clinker .....	22
Tableaux IV.3 Composition minéralogique du Clinker selon la formule de BOGUE .....	22
Tableaux IV.4 Analyse physico-mecanique de ciment .....	22
Tableaux IV.5 Analyse granulométrique de sable de dune. ....	23
Tableaux IV.6 caractéristique de sable .....	23
Tableaux IV.7 Compositions du mortier normal .....	24
Tableaux IV.8 Les différents mélanges préparés pour l'activation chimique pour les deux sables .....	25
Tableaux IV.9 Consistances normales, temps de prise de ciment activant chimique.....	29

## Chapitre V

Tableaux V.1 La matrice d'expériences .....	37
Tableaux V.2 Résumé de l'ajustement.....	39
Tableaux V.3 Estimations des coefficients triés .....	40
Tableaux V.4 Résumé de l'ajustement.....	41
Tableaux V.5 Estimation des coefficients triés. ....	42
Tableaux V.6 Résumé de l'ajustement.....	43
Tableaux V.7 Estimations des coefficients triés .....	44
Tableaux V.8 Résumé de l'ajustement . ....	45
Tableaux V.9 Estimation des coefficients triés .....	46
Tableaux V.10 Matrice d'expériences .....	47
Tableaux V.11 Résumé de l'ajustement .....	49
Tableaux V.12 Estimations des coefficients triés .....	49
Tableaux V.13 Résumé de l'ajustement.....	51
Tableaux V.14 Estimation des coefficients triés. ....	52
Tableaux V.15 Résumé de l'ajustement.....	53
Tableaux V.16 Estimations des coefficients triés .....	54
Tableaux V.17 Résumé de l'ajustement .....	56
Tableaux V.18 Estimation des coefficients triés .....	56

## Résumé

Le présent travail vise à étudier l'effet de l'activation des ciments sur les différentes propriétés de mortiers., ont été utilisées afin d'analyser l'influence de l'activation chimique sur le comportement des mortiers aux états frais et durci.

Les propriétés des mortiers activées chimiquement en utilisant des solutions alcalines (KOH et Na OH) à des dosages de 0, 1.5 et 3 %. Egalement Les deux types de sables ont été employés un sable normalisé et sable de dune (Oued souf) pour l'accomplissement du programme expérimental.

Une analyse factorielle des résultats en utilisant la méthode de plan d'expériences (JMP) et méthode (Excel) a fait l'objet de cette étude.

Les propriétés telles que la consistance, début et fin de prise et la réponse mécanique (résistance à la flexion et à la compression) sont étudiées et comparées avec celles des mortiers témoins.

Les résultats obtenus ont montré l'effet bénéfique de modes d'activation chimique principalement, une amélioration est constatée sur la réponse mécanique (résistance à la compression) au jeune âge et à long terme.

L'étude corrélative par les méthodes de plan d'expérience (JMP) et Excel a permis de tirer des modèles mathématiques adéquats avec des coefficients de corrélation très acceptables  $R^2$  supérieurs à 0.90 pour la modélisation de la réponse mécanique ( $R_c$ ,  $R_f$ ) dans la présente étude d'activation chimiques par alcalins KOH et NAOH des mortiers. En particulier, le pourcentage optimal de 1,5 % qui paraît avec des résultats avantageux pour l'évaluation de la résistance à court, moyen et long terme.

## Abstract

The present work aims to study the effect of the activation of cements on the different properties of mortars., Were used to analyze the influence of chemical activation on the behavior of mortars in fresh and hardened states.

The properties of chemically activated mortars using alkaline solutions (KOH and Na OH) at dosages of 0, 1.5 and 3%. Equal The two types of sands were used a standardized sand and dune sand (Oued souf) for the accomplishment of the experimental program.

A factor analysis of the results using the design of experiments method (JMP) and method (Excel) was the subject of this study.

Properties such as consistency, start and end of setting and mechanical response (resistance to bending and compression) are studied and compared with those of control mortars.

The results obtained showed the beneficial effect of chemical activation modes mainly, an improvement is observed in the mechanical response (compressive strength) at young age and in the long term.

The correlative study by the methods of experimental design (JMP) and Excel made it possible to draw adequate mathematical models with very acceptable correlation coefficient  $R^2$  greater than 0.90 for the modeling of the mechanical response ( $R_c$ ,  $R_f$ ) in the presents a study of chemical activation by KOH and NAOH alkalis in mortars. In particular, the optimal percentage of 1.5% which seems to have advantageous results for the evaluation of resistance in the short, medium and long term.

## الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير تفعيل قذائف الهاون الاسمنت على الخصائص المختلفة للملاط. تم استخدام هذا البحث لتحليل تأثير تفعيل الكيماوي والسلوك الميكانيكي لقذائف الهاون في الحالة الطازجة والمتصلبة . خصائص قذائف الهاون تفعيلها كيميائيا باستخدام المحاليل القلوية (هيدروكسيد الصوديوم وهيدروكسيد البوتاسيوم) بجرعات 0، 1.5 و3% .

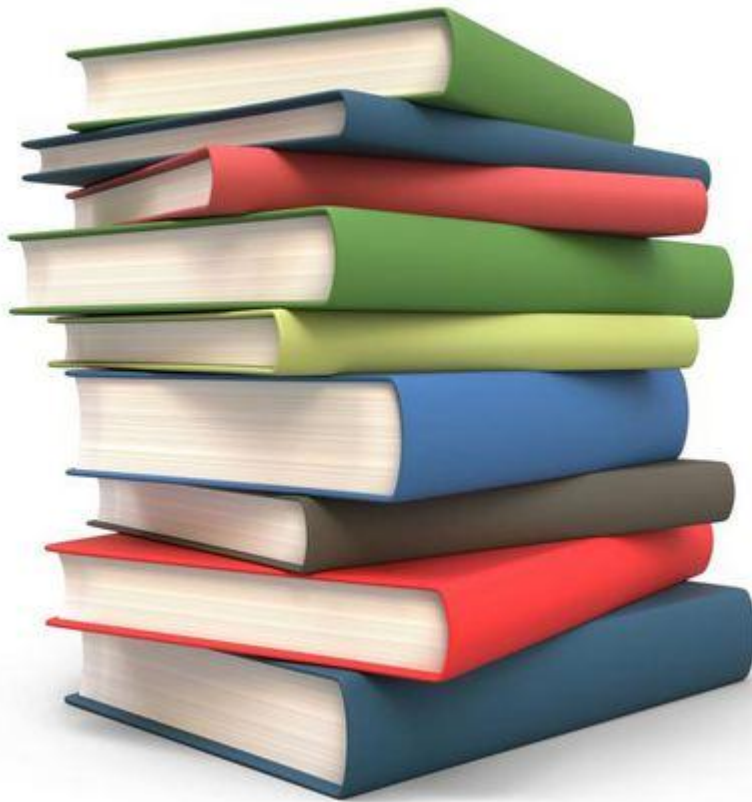
خلال هذه الدراسة استخدمت نوعين من الرمال (رمل معياري ورمل لكثبان من منطقة واد سوف لإنجاز البرنامج التجريبي .

يتم تحليل عامل النتائج باستخدام طريقة تصميم التجارب (JMP) وطريقة (Excel) موضوع هذه الدراسة . تمت دراسة خصائص الكثافة وبدء ونهاية التصلب والاستجابة الميكانيكية (مقاومة الانحناء والضغط).

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها التأثير الإيجابي لأنماط التنشيط الكيماوي بشكل رئيسي ، لوحظ تحسن في الاستجابة الميكانيكية (قوة الضغط) في سن مبكرة وعلى المدى الطويل.

أتاحت الدراسة المترابطة بواسطة طرق التصميم التجريبية (JMP) وExcel إمكانية اشتقاق نماذج رياضية مناسبة مع معاملات ارتباط مقبولة جداً  $R^2$  أكبر من 0.90 لنمذجة الاستجابة الميكانيكية (Rf ، Rc) في دراسة عن التنشيط الكيماوي. بواسطة KOH و NaOH القلويات في مدافع الهاون. على وجه الخصوص ، النسبة المثلى 1.5% والتي يبدو أن لها نتائج مفيدة لتقييم المقاومة على المدى القصير والمتوسط والطويل.

# Introduction Générale



# INTRODUCTION

Lorsque le ciment Portland est mélangé avec de l'eau, il se produit plusieurs réactions chimiques, ces réactions font intervenir les différents constituants du ciment hydrates. Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout.

Le ciment portland composé (C.P.J-C.E.M II) avec ajout se distingue par un durcissement ralenti sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinairesans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (C.P.A-C.E.M I). Cette propriété latente du ciment avec ajout (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines (adjuvant) qui modifient la prise et le durcissement

## L'OBJECTIF ET PROBLEMATIQUE

Activation chimique d'un ciment CEM I 42.5/N en utilisant des solutions alcalines (NaOH, KOH) à des dosages de 0, 1.5 et 3 %.

Deux types de sable ont été utilisé pour réaliser le programme expérimental ; un sable normalisé certifié CEN, EN 196-1 et un sable de dune ramené d'Oued Souf du sud algérien.

L'object de ce travail est de voir l'effet d'activant sur le développement de la résistance des mortiers confectionnés à partir de deux types de sables à jeune âge et à longue terme.

Une meilleure lecture des résultats obtenus en utilisant la méthode de plans d'expérience JMP dans l'analyse et l'interprétation des résultats du dite programme expérimental a fait l'objet de notre sujet d'étude.

## Plan de mémoire

Le mémoire se divise en cinq chapitres.

**Le premier chapitre :** de ce travail est destiné à l'étude bibliographique (Généralités sur les ciments).

**Le deuxième chapitre :** Nous présenterons les modes d'activations des ciments.

**Le troisième chapitre :** est consacré à la partie expérimentation (une présentation de la méthode de plans d'expérience).

**Le quatrième chapitre :** on présente les différents matériaux utilisés ; ainsi que leurs Caractéristiques, entrant dans la composition des mortiers à confectionner et cela par des essais au laboratoire.

**Le cinquième chapitre :** présente l'ensemble des résultats obtenu et les discussions tirées.

Ce mémoire se terminera par une conclusion général les principaux résultats de cette recherche et dégagera les perspectives à ce travail.

# Chapitre I



## I. Le Ciment

### I.1 Définition et généralités

Selon la norme européenne [EN197-1] le ciment est un liant hydraulique, en d'autres termes, une matière inorganique finement moulue, qui lorsqu'elle est gâchée avec de l'eau forme une pâte permettant de faire prise et qui durcit suite à des réactions et au processus d'hydratation. Cette matière conserve, après durcissement, sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment est gâché et mélangé avec des granulats et de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton. Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituants.

### I.2 Types de ciment

Il existe différents types de ciment selon leur composition et selon leur résistance. [Saidat, 2013]

#### I.2.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

D'après la norme EN 197-1 définit 5 types de ciment selon leur composition

- Ciment Portland (CEM I) : Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.
- Ciment Portland composé (CEM II/A ou B) : Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 20% (A) 35 % (B) d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.
- Ciment de haut fourneau (CEM III/A, B ou C) : Il contient entre 36 et 95 % de laitier et 5 à 64 % de clinker.
- Ciment au laitier et aux cendres (CEM V/A ou B) : Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.
- Ciment de type pouzzolanique (CEM IV /A ou B) : Avant l'introduction de la EN 197-1, il était connu sous l'appellation CPZ.

# CHAPITRE I: LE CIMENT

## I.2.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance

Les ciments sont répartis en trois classes, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours. La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme EN 196.1

Désignation de la classe	Résistance à la compression en MPA			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	-	$\geq 16$		
32,5 R	$\geq 10$	-	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
42,5 N	$\geq 10$	-		
42,5 R	$\geq 20$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5 N	$\geq 20$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30$	-		

Tableau (I.1) : Définition des classes de résistance.

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R) [Briki, 2019].

## I.3 Composition d'un ciment portland

Avant de décrire les mécanismes de l'hydratation du ciment il semble nécessaire de faire un rappel sur la nature et la composition du ciment le plus couramment utilisé. Le ciment Portland est un liant hydraulique obtenu de la cuisson d'un mélange principalement composé de calcaire et d'argile. Ces matériaux doivent contenir respectivement des proportions appropriées de chaux (provenant de la pierre calcaire) et de fer, de silice et d'alumine (apportés par l'argile) [Kosmatkas, 1991]. Les matières premières sélectionnées sont broyées, moulues et dosées pour obtenir un mélange de composition chimique donnée. Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies [Kerbouche, 2009] :

# CHAPITRE I: LE CIMENT

-Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) de 77 à 83%.

-Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14%.

-Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4%.

-Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 1,5 à 3 %.

Le procédé de fabrication employé est sec ou humide ; dans le procédé par voie sèche, le broyage, l'homogénéisation et le chargement du four se font avec des matériaux secs, alors que dans le procédé par voie humide, de l'eau est ajoutée et les mêmes opérations sont faites sur une pâte liquide. Après homogénéisation, les matières premières broyées sont introduites dans la partie supérieure d'un four. Dans la partie inférieure du four, la température est maintenue à environ 1450 °C pour transformer chimiquement la matière première en clinker de ciment. Le clinker est ensuite refroidi et réduit en poudre. Au cours de cette opération, on ajoute une faible quantité de gypse (moins de 5%) afin de régulariser le temps de prise du ciment [Baron, 1997], [Verbeck, 1968], [Belagraa et al, 2016]. Le produit pulvérisé ainsi obtenu constitue le ciment Portland. Le diamètre des particules de ciment est compris entre 1 et 80  $\mu\text{m}$  et elles ont une surface spécifique mesurée avec l'appareil Blaine, de près de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  [MALHOTRAV, 1987], et une densité de l'ordre de 3,15. La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le Tableau I.2.

Oxydes	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
%	19-25	2-9	1-5	62-67	0-3	1-3	0,6	0,2

**Tableau I. 2** : Composition chimique du clinker de ciment Portland ordinaire [Taylor, 1997]

Le rapport en masse ( $\text{CaO}$ )/ ( $\text{SiO}_2$ ) ne doit pas être inférieur à 2,0 et la teneur en oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse [EN, 2011].

La réaction du mélange finement broyé de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et d'argile (kaolin) conduit à la décarbonatation du  $\text{CaCO}_3$ , à l'élimination de l'eau du kaolin et à la réaction de  $\text{CaO}$  avec les produits de l'argile pour former des silicates et des aluminates de calcium. La composition minéralogique du clinker peut être déterminée par d'autres moyens plus ou moins précis : microscope optique et diffraction X.

Les ciments Portland sont normalement constitués à 95% de leur masse de quatre composants principaux qui sont :

# CHAPITRE I: LE CIMENT

---

## I.3.1 Silicate tricalcique (C3S)

Cette phase constitue le composé principal du ciment (50 à 70%). Les cimentiers la désignent par le mot « alite » qui est une forme impure de C<sub>3</sub>S. En effet, le C<sub>3</sub>S contient soit en substitution des ions Ca ou Si, soit en insertion dans le réseau cristallin des traces de Mg, Al et Fe. Ces impuretés améliorent généralement la réactivité du ciment. La teneur en impureté du C<sub>3</sub>S dépend, entre autres, de la nature des matières premières, de la température de cuisson et de mode de refroidissement du clinker. Il est bon de souligner que l'alite confère essentiellement sa résistance au ciment, en particulier à court terme.

## I.3.2 Silicate bicalcique (C2S)

Le C<sub>2</sub>S constitue entre 15 et 30% du ciment Portland. Les cimentiers le désignent par « bélite » qui est une forme impure de C<sub>2</sub>S. Dans le C<sub>2</sub>S, on retrouve, en plus du potassium, les mêmes ions étrangers que dans le C<sub>3</sub>S, mais ils y sont en plus grande quantité. La bélite fournit au ciment sa résistance à long terme. Il existe au moins quatre variétés polymorphiques de C<sub>2</sub>S ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) et leur domaine de stabilité est différent selon le chauffage et le refroidissement. La forme  $\beta$  est celle que l'on rencontre le plus souvent dans les clinkers industriels. Lors d'un refroidissement lent, la forme  $\beta$  peut se transformer en  $\gamma$  qui n'a aucune propriété hydraulique. Contrairement au C<sub>3</sub>S, les propriétés hydrauliques du C<sub>2</sub>S varient considérablement selon la variété polymorphique.

## I.3.3 Aluminate tricalcique (C3A)

Le C<sub>3</sub>A, qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante. Dans les clinkers, la présence d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C<sub>3</sub>A. Ainsi, selon la quantité totale d'alcalis dissous dans le réseau cristallin, le C<sub>3</sub>A peut être cubique, orthorhombique ou monoclinique. Généralement dans le ciment, le C<sub>3</sub>A est toutefois un mélange des formes cubique et orthorhombique, mais rarement monoclinique. Le C<sub>3</sub>A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C<sub>3</sub>A cubique.

## I.3.4 Aluminoferrite tétracalcique (C4AF)

Le C<sub>4</sub>AF représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland. Les formes C<sub>6</sub>A<sub>2</sub>F et C<sub>4</sub>AF sont les plus couramment rencontrées dans le ciment. La réactivité de l'aluminoferrite tétracalcique dans l'eau est modérée et elle augmente avec la teneur en alumine.

# CHAPITRE I: LE CIMENT

Les phases C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF sont liquides à la température de formation du clinker, et elles constituent au cours du refroidissement, une phase interstitielle qui cristallise entre les cristaux de C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S.

## I.3.5 Les composés mineurs

Comme il a été dit précédemment, aucune des phases principales du clinker ne se trouve à l'état pur. La présence d'impuretés dans le clinker (MgO, sulfates alcalins, CaO<sub>2</sub>) joue un rôle important sur les propriétés hydrauliques du ciment. Ces composés mineurs proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

Composants	Alite	Bélite	Célite	Félite
Composition Chimique	Silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C <sub>3</sub> S)	Silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C <sub>2</sub> S)	Aluminate Tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C <sub>3</sub> A)	Alumino-férrite tétracalcique $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C <sub>4</sub> AF)
Taux d'hydratation	Rapide (Heures)	Lent (Semaines)	Instantané	Très rapide (1 jour)
Développement de la résistance	Rapide (jours)	Lent	Très rapide (1 jour)	Très rapide (1 jour)
Chaleur d'hydratation	Moyenne ( 500 j/g)	Basse ( 250 j/g)	Très haute ( 850 j/g)	Moyenne ( 450 j/g)
Remarques	Constitue les caractéristiques du CEM I	Contribue à l'augmentation des résistances à long Terme	Instable dans l'eau, sensible aux attaques des sulfates	Donne au ciment la couleur grise

**Tableau I. 3** : Principaux constituants du ciment Portland et leurs caractéristiques

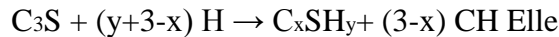
[MERCIER, 1999].

## I.4 Hydratation du ciment

### I.4.1 Hydratation du C3S et du C2S

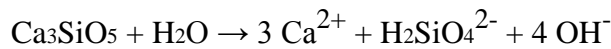
Elle produit des silicates de calcium hydratés notés C-S-H et de la portlandite [BARRET, 1979], [BARRET, 1986].

La réaction complète est la suivante :

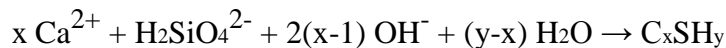


peut être décomposée en trois étapes :

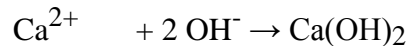
- 1) Dissolution congruente des grains de C<sub>3</sub>S ayant subi un hydroxylation superficiel



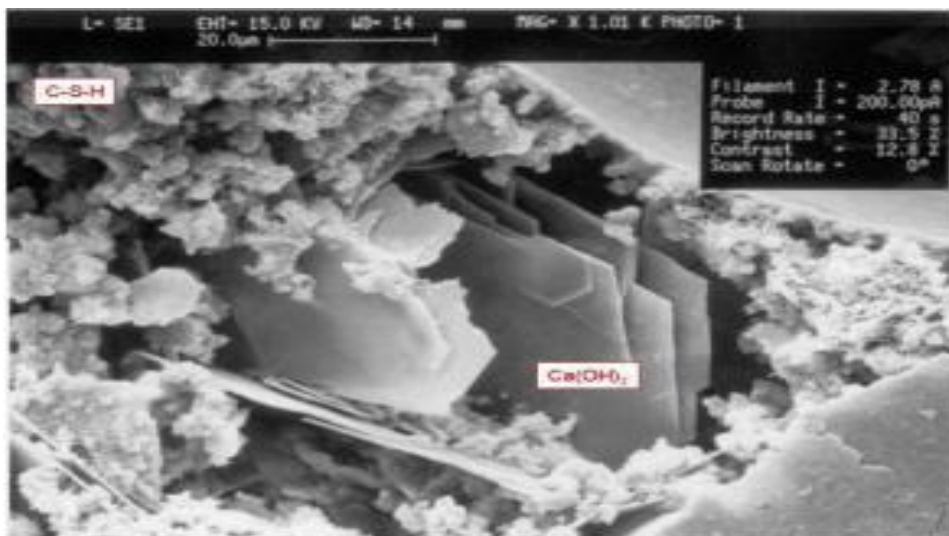
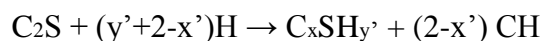
- 2) Précipitation des ions silicates précipitent lorsqu'ils atteignent la sursaturation pour former des silicates de calcium hydratés de stœchiométrie variable. La dissolution du C<sub>3</sub>S se poursuit simultanément



- 3) Précipitation des ions calcium sous forme de portlandite simultanément aux deux autres réactions.



L'hydratation du C<sub>2</sub>S aboutit aux mêmes produits mais avec des cinétiques différentes. Il existe cinq polymorphes du silicate bicalcique (ou bélite à pression ordinaire), mais seul le β-C<sub>2</sub>S possède des propriétés hydrauliques significatives.



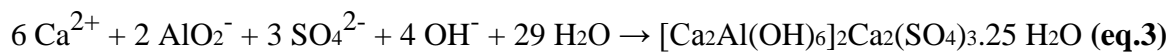
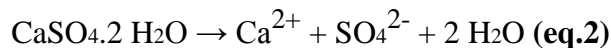
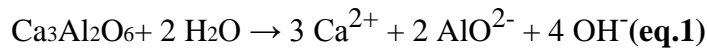
**Figure I. 1** Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de portlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage G = x 1010 [Moudilou, 2000].

# CHAPITRE I: LE CIMENT

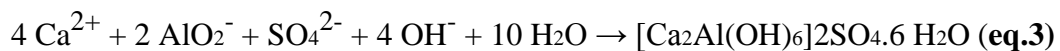
## I.4.2 Hydratation de C<sub>3</sub>A

L'hydratation du C<sub>3</sub>A, naturellement très réactif, dans le ciment, est contrôlée par l'ajout de sulfate de calcium sous forme de gypse (CaSO<sub>4</sub>.2 H<sub>2</sub>O), d'hémihydrate (CaSO<sub>4</sub>.½ H<sub>2</sub>O) ou d'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>) [Baron 1997], [Verbeck 1968]. Les réactions se déroulent selon la séquence suivante :

- 1) Période initiale de dissolution rapide du C<sub>3</sub>A (eq.1) et du gypse (eq.2). Les ions se recombinaient instantanément pour former des cristaux d'ettringite ou trisulfoaluminate de calcium hydraté (TSA), de notation cimentière (C<sub>3</sub>A.3CS.H<sub>32</sub>), composé apparaissant sous forme d'aiguilles très fines (eq.3).



- 2) Au bout de 10 à 24 heures, l'épuisement du gypse, généralement en défaut par rapport au C<sub>3</sub>A (la formation d'ettringite consomme 3 moles de sulfate de calcium pour une mole de C<sub>3</sub>A), fait chuter la concentration en ions sulfate. La solution devient sous-saturée par rapport à l'ettringite, qui est dissoute partiellement et qui forme avec le C<sub>3</sub>A excédentaire du monosulfoaluminate de calcium hydraté [Regoud, 1986], de notation cimentière (C<sub>3</sub>A.CS.H<sub>12</sub>)



A long terme, la composition en aluminates de la pâte de ciment dépend des proportions relatives de gypse et C<sub>3</sub>A. Les ciments portland contiennent 8 à 12 % de C<sub>3</sub>A et 5 % de gypse, soit un rapport molaire de 0,8 qui correspond théoriquement à un mélange de monosulfoaluminate de calcium hydraté et de C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> issu de la réaction d'hydratation du C<sub>3</sub>A seul, dont la réaction-bilan s'écrit : C<sub>3</sub>A + 6 H → C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>. Cependant, l'analyse par diffraction des rayons X de pâtes de ciments courants hydratés, montrent généralement que la phase alumineuse majoritaire est l'ettringite.

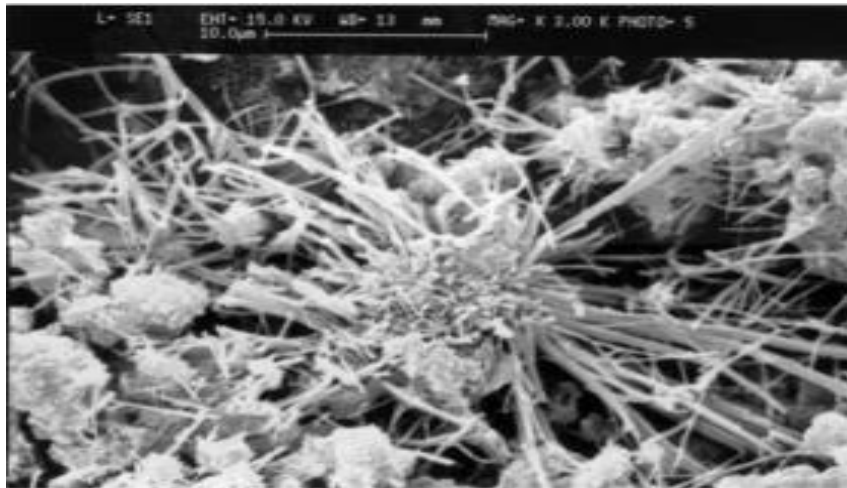


Figure I. 2 Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage [Moudilou, 2000]

# CHAPITRE I: LE CIMENT

---

## I.4.3 Hydratation de C<sub>4</sub>AF

L'hydratation du C<sub>4</sub>AF est semblable à celle du C<sub>3</sub>A mais la vitesse de réaction est plus lente et les hydrates formés contiennent du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[Moudilou, 2000]. Les produits de réactions sont les mêmes que ceux issus du C<sub>3</sub>A en substituant aux aluminates des alumino-ferrites. En présence de sulfate de calcium, les phases hydratées sont C<sub>3</sub>(A,F) 3CS.H<sub>32</sub>, C<sub>3</sub>(A,F) 3CS.H<sub>12</sub>, et C<sub>3</sub>(A,F) H<sub>6</sub>.

## I.4.4 Hydratation en présence des additions minérales

Les additions minérales d'un ciment sont dites « *pouzzolaniques* » quand elles consomment l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment et la silice pour créer des CSH dits « *secondaires* », par opposition aux CSH obtenus par hydratation directe du C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S.

Le mécanisme d'hydratation de base reste le même pour un ciment ordinaire de type Portland et un ciment contenant des additions minérales, pourtant des différences sont observables. D'un point de vue cinétique, les réactions d'hydratation sont plus lentes en présence d'additions minérales. De plus, la nature des hydrates formes n'est pas la même. La variation de composition de la solution porale en présence d'additions modifie le pH en fonction de la nature de celles-ci et influence la réactivité des espèces anhydres en orientant la formation des produits ou hydrates : l'hydroxyde de calcium n'est présent qu'en traces et la nature des CSH apparaît profondément changée (diminution du rapport C/S, variation morphologique) [Perlot, 2005].

## I.5 Le phénomène de prise

Le durcissement est un phénomène de cristallisation il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. Les hydrates se forment (à partir d'un délai correspondant au début de prise) et s'enchevêtrent les uns avec les autres.

La prise est le phénomène qui transforme une suspension plus ou moins diluée de grains réactifs en un solide cohérent, mécaniquement résistant. Dans le cas des matrices cimentaires, on l'observe généralement entre 2 h et 6 h après le gâchage.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température. Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tel que la nature et la finesse de mouture du ciment, plus son broyage a été poussée, plus le temps de prise est court.

Le temps de prise dépend fortement du rapport E/C initial alors que le pic de dégagement de chaleur d'hydratation est peu modifié [Bombléd, 1976]

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné la définition du ciment et les principaux constituants et les types des ciments. On a aussi parlé sur l'hydratation du ciment.

# Chapitre II



## II. Modes d'activation des ciments

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les différentes méthodes d'activation des ciments comme moyens d'accélérer le durcissement surtout à jeune âge. Cet aspect concerne le mode d'activation chimique par l'utilisation de solution basique (NaOH, KOH).

### II.2. Méthodes d'activation du ciment

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout (C.P.A-C.E.M I). Ce type de ciment (CPJ-CEM II) présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température). En général, les différents types d'activation peuvent être classés en trois catégories. [Saidat, 2013] (Figure II- 1) :

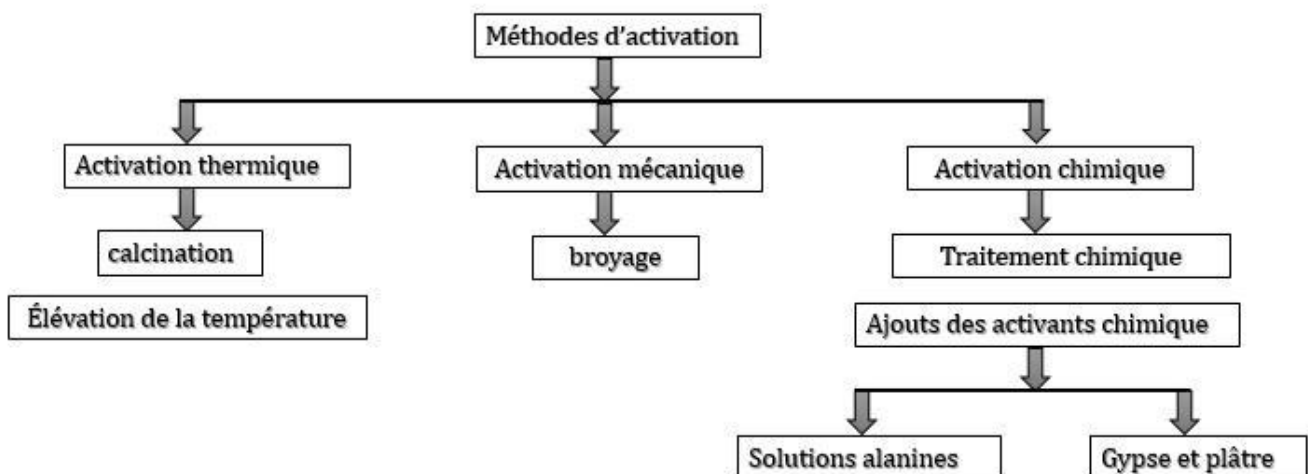


Figure II. 1 : Les différentes méthodes d'activation selon [Saidat 2013]

### II.3 Différentes méthodes d'activation

#### II.3.1 Activation chimique

##### II.3.1.1 Activation par les alcalis caustiques

Généralement le liant hydraulique (C.P.J. ciment portland composé) est activé par différentes solutions alcalines, telles que. L'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages en faisant varier la molarité de la solution basique.

Les activateurs chimiques (accélérateurs de prise et de durcissement) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important [Laadjel, 2019].

Ce sont surtout :

- Des alcalis (soude. NaOH, potasse. KOH) pour la prise,
- Des chlorures de calcium (CaCl<sub>2</sub>) pour le durcissement.

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2% du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsqu'un durcissement rapide est souhaité.

La prise du ciment est généralement lente, l'ajout des activateurs chimiques et le broyage plus poussé du ciment présentent des solutions à ce phénomène.

##### II.3.1.2 L'activation sulfatique (gypse et plâtre)

Ce type d'activation a fait l'objet des études faites par [Runzhang, 1988]. Dans ce type d'activation, une véritable réaction produira entre les constituants du ciment et le sulfate de calcium, ce dernier (CaSO<sub>4</sub>) qui se combine avec les composants du ciment dissous dans l'eau, pour donner naissance à l'ettringite, la quantité de l'alumine qui reste, constitue l'hydroxyde d'aluminium et du silicate de calcium hydraté [Maanene, 2018; Ladjel, 2019; Belagraa et al., 2020].

#### II.3.2 Activation mécanique

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse (surface spécifique) du ciment par broyage poussé. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante) [Maanene, 2018 ; Ladjel, 2019 ; Belagraa et al., 2020] ; [Benia, 2008]

## CHAPITRE II : MODES D'ACTIVATION DES CIMENTS

---

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède.

- Plus de C3S,
- Moins de C3A,
- Le plus possible de petits cristaux.

Selon certains chercheurs, plus le rapport.  $[(C3S + C2S) / (C3A + C4AF)]$  est élevé, plus facile est le broyage [Laadjal, 2001].

Les travaux de Nasri 2007[A. Nasri, 2007] a observé l'augmentation de la finesse ainsi que la composition chimique sont les principaux responsables de l'accroissement des performances mécaniques.

Selon [A. Bessa, 2004] et [Gallias, 2000] L'effet granulaire des additions minérales sur les formulations de mortier dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite.

### II.3.3 Activation thermique

L'activation thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) consiste à conserver le matériau (éprouvette) dans une étuve à vapeur à différentes températures de cure 20°C, 40°C et 60°C pendant 7 jours. Ensuite, il sera mis dans un bassin d'eau à une température de 20 °C jusqu'à la date de l'essai mécanique programmé (7, 14 et 28 jours).

De nombreuses études ont été menées afin d'éclaircir l'influence de la température sur les différents mécanismes impliqués durant l'hydratation [Verbeck, 1968], [Goto, 1981],[Kjellsen, 1990], [Kjellsen, 1991] [Kjellsen, 1992] [Asaga, 1992].La température élevée provoque une modification des propriétés intrinsèques, de la morphologie et de l'agencement des hydrates formes ; elle a pour effet d'encapsuler les grains anhydres dans des couches d'hydrate de faible porosité qui limiteraient ainsi leur hydratation en ralentissant considérablement la diffusion de l'eau vers les grains de ciment anhydres[Verbeck, 1968]; [Kjellsen, 1990]; [Barnett, 2006]; [Laadjel, 2019].

L'hétérogénéité dans la répartition des hydrates engendre la formation de larges pores entre les grains [Barnett et al., 2006]. L'augmentation du diamètre des pores pour des températures élevées [Kjellsen, 1991], [Eren, 2002] [Aldea, 2005]se traduit par une diminution de la résistance à long terme par rapport au matériau cure à température faible ou modérée, même à degré d'hydratation comparable

### II.4 Comparaison entre les différents types d'activation

Une comparaison entre les différentes méthodes d'activation des pouzzolanes indique que l'activation chimique a des avantages, un faible cout énergétique notamment. En effet, une série d'études montre que l'ajout d'un activant peut augmenter la réactivité des pouzzolanes [Shin et Day, 1996] en tant que processus de production simple des matériaux cimentaires, par rapport aux activations mécanique et thermique qui ont besoin d'équipements supplémentaires, consomment beaucoup d'énergie et augmentent ainsi les couts. Les activant chimiques peuvent être ajoutés au cours du broyage de la pouzzolane ou du ciment, ou ajoutés pendant le malaxage dans l'eau de gâchage ou mélanges directement avec le liant [Sajedi et Razak, 2011]. Ainsi, l'activation chimique n'a pas besoin de changement significatif sur la ligne de production, et elle peut être facilement acceptée par l'industrie du ciment et du béton [Shin, 2001]. De plus, l'activation thermique n'est pas possible pour tous les types de bétons. Elle est utilisée en préfabrication, ou les moyens d'étuvage existent déjà. Pour les bétons prêts à l'emploi, l'activation mécanique est adaptée. [Laadjel, 2001, 2019].

En termes de résistances, Qian et al [Qian et al., 2001] ont trouvé que l'addition de l'activant sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente davantage la résistance d'un mortier (chaux+cendre volante) que l'activation mécanique de la cendre volante seule.

### II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné les différentes méthodes d'activation des ciments.

# Chapitre III



### Introduction

La présente partie est consacrée à présenter la méthode de plan d'expérience, ainsi que les différentes formules mathématiques et les méthodes existant afin de réaliser un plan d'expérience.

### III.1 Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres (facteurs) tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Elle permet d'extraire le maximum d'informations avec un minimum de résultats. La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié. [Vigier, 1988] ; [Maanane, 2018]

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- \* Diminution du nombre d'essais.
- \* Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- \* Détection des interactions entre facteurs.
- \* Modélisation des réponses étudiées.
- \* Une précision optimum des résultats. [Frédéric, 1995]

### Le facteur

On qualifie de facteur toute variable, obligatoirement contrôlable, susceptible d'influer sur la réponse observée. La différence fondamentale entre la notion classique de variable et celle de facteur tient donc dans le fait que tout facteur doit pouvoir être modifié sans difficulté [Tinsson, 2010].

Chaque facteur peut être :

- 1- Facteur quantitative : Ses valeurs sont alors des nombres exprimant une quantité et sur lesquels les opérations arithmétiques (somme, soustraction, etc....) ont un sens. Le facteur peut alors être discrète ou continue selon la nature de l'ensemble des valeurs qu'elle est susceptible de prendre (valeurs isolées ou intervalle).
- 2- Facteur qualitative : Ses valeurs sont dans ce cas des modalités, ou catégories, exprimées sous forme littérale ou au moyen d'un codage numérique et sur lesquelles des opérations arithmétiques n'ont aucun sens. On distingue des variables qualitatives ordinales et nominales, selon que les modalités peuvent être naturellement ordonnées ou pas.

## La réponse

La grandeur mesurée afin de connaître les effets des facteurs sur le système. Il convient bien sûr que la réponse soit représentative du phénomène observé.

La réponse expérimentale peut être le résultat d'une expérience réelle mais aussi le résultat d'une simulation numérique [VIVIER, 2002], [Ladjel, 2019 ; Belagraa et al., 2020]

## III.2 Domaine expérimental

Pour chaque étude, l'expérimentateur choisit une partie d'espace expérimental pour effectuer leur recherche. Cette zone spéciale de l'espace expérimental est le domaine expérimental. Le domaine expérimental ou Domaine d'étude peut être défini comme l'ensemble de tous les points de la surface délimitée par les niveaux bas et haut de chaque facteur,

Lorsque  $k = 2$ , un carré est obtenu pour le DE. Les points expérimentaux sont alors situés aux quatre sommets du carré Figure III.1

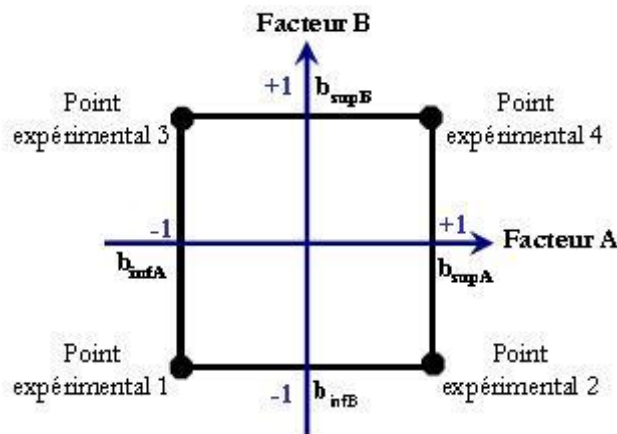


Figure III. 1 : Domaine d'étude d'un plan  $2^2$

Lorsque  $k = 3$ , nous obtenons un cube dont les huit sommets représentent les huit essais du plan (Figure III.2).

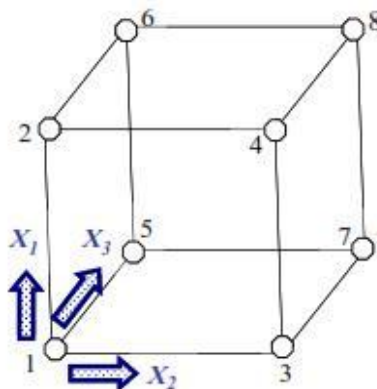


Figure III. 2 : Domaine d'étude d'un plan  $2^3$

### III.3 Méthodologique d'un plan d'expériences

L'élaboration d'un plan d'expériences peut être décomposée en différentes étapes :

#### 1. La recherche des facteurs influents

C'est de loin l'étape la plus importante dans la conduite d'un Plan d'Expériences. Cette étape nécessite préalablement une Sélection des paramètres, un choix des modalités et des interactions à étudier. Il faut aussi Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs [François, 2005], [Pill, 1999].

#### 2. Définition du domaine expérimental

La définition du domaine expérimental suit directement de l'étape précédente, à savoir de la définition des facteurs et de leurs modalités. Il s'agit donc de l'espace des expériences réalisables [Pill, 1999].

#### 3. Définition du modèle empirique

Cette étape revient à choisir une forme de modèle adaptée aux objectifs de l'étude ainsi que chercher quelle est l'équation mathématique régissant [François, 2005].

Le modèle retenu doit bien présenter la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt. Et aussi aboutir pour la valeur de la réponse étudiée à une estimation de qualité acceptable.

### III.4 Types de plan d'expériences

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en trois grandes familles

#### III.4.1 Plans factoriels complets

Un plan factoriel ou plan complet est obtenu lorsque au moins un essai pour chaque combinaison de facteur est réalisé.

### III.4.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans permettent l'étude de k facteurs à raison de deux niveaux (-1, +1) par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des k facteurs à leurs deux niveaux. Le nombre d'expériences à réaliser se calcule par : le nombre d'expériences =  $2^k$  \* nombre de facteur.

### III.4.1.2 Plans factoriels à N niveaux et P paramètres

Il est parfois nécessaire d'augmenter le nombre de niveaux d'un facteur afin de mieux maîtriser l'action de ce facteur. Dans ce cas il faut être prudent, car le nombre d'expériences augmente rapidement. Le nombre d'expériences =  $N^P$

### III.4.2 Plans fractionnaires

Les plans fractionnaires sont très utiles et mettent en évidence l'intérêt primordial de la méthode des plans d'expériences, qui est de permettre de diminuer considérablement le nombre d'expériences nécessaires à la construction d'un modèle. Mais cependant, il est prudent de garder un certain esprit critique face aux résultats que fournissent les plans fractionnaires, car ils nécessitent une certaine maîtrise de leur construction et de l'interprétation des résultats.

#### III.4.2.1 Plans fractionnaires à deux niveaux

Les plans fractionnaires à deux niveaux sont des plans optimaux, permettant de réduire la charge expérimentale, proposée par un plan factoriel complet, en focalisant sur les effets les plus intéressants.

La solution proposée par les plans fractionnaires consiste à utiliser pour l'étude de k facteurs les matrices des effets des plans complets  $2^{k-p}$ . L'avantage de ces plans est évident : la charge expérimentale est divisée par  $2^p$  par rapport aux premiers plans, p est le nombre de facteurs alaisés « confondus » délibérément, c'est-à-dire qui ont des niveaux de même alternance dans la matrice des expériences [Vigier, 1988].

#### III.4.2.1 Plan fractionnaire à N niveaux et P paramètres

Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences qu'un plan factoriel.

Le nombre d'expériences =  $n^{P-K}$

La matrice d'expériences est donc divisée k fois.

### III.5 Méthodes des surfaces de réponse

La méthode des surfaces de réponse constitue le second volet intéressant de la méthode des plans d'expérience. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative [Viver, 2002]. Dans cette méthode, les modélisations de la fonction réponse peuvent également servir de base à la recherche de conditions optimales. On parle alors d'optimisation indirecte. L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. La modélisation d'une surface de réponse s'appuie sur l'analyse de la variation des résultats d'essais obtenus suite à un plan d'expérience. La surface de régression ainsi obtenue doit posséder une qualité descriptive et prédictive devant être le meilleur possible au sein du domaine expérimental.

### III.6 Analyse des résultats

#### III.6.1 Analyse de régression

L'analyse de régression permet d'établir le coefficient de détermination  $R^2$  à partir de la relation suivante :

$$R^2_{\text{ajusté}} = 1 - \frac{\frac{SCE}{N-P}}{\frac{SCT}{N-1}}$$

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, mesure l'intensité du lien linéaire entre les valeurs observées et prévues. La valeur du coefficient de corrélation est comprise entre  $-1$  et  $1$ .

Pour estimer la qualité descriptive du modèle, dans le cas de plusieurs variables explicatives, il faut obligatoirement utiliser le coefficient de détermination ajusté  $R^2_{\text{ajusté}}$ , et éviter d'utiliser le coefficient de détermination  $R^2$ .

Le coefficient de détermination ajusté  $R^2_{\text{ajusté}}$  calculer par la relation suivante :

$$R^2_{\text{ajusté}} = 1 - \frac{\frac{SCE}{N-P}}{\frac{SCT}{N-1}}$$

Plus les valeurs de  $R^2$  et  $R^2_{\text{ajusté}}$  sont proches de  $1$ , plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante [GOUP, 1996].

### III.6.2 Analyse de la variance

L'analyse de la variance permet d'estimer si les effets calculés sont significatifs ou si ces effets proviennent de facteurs non contrôlés (non étudiés dans le plan). En particulier, le test de SNEDECOR-FISHER, permet de déterminer si un facteur a des chances d'être significatif. Ce test repose sur le calcul de la variance résiduelle ( $V_r$ ) et de la variance entre échantillon pour un facteur ( $V_A$ ). Le rapport  $V_A/V_r$  suit une loi de F (FISHER) à A et r degrés de liberté, où.

$$V_r = \frac{\sum r^2}{ddl_{residus}} \quad V_A = \frac{\sum A_i^2}{ddl_{facteur A}}$$

Le test consiste donc à comparer le rapport  $V_A/V_r$  avec la valeur théorique de la table de SNEDECOR définie pour des niveaux de significations de 5% et 1%. Ces tables se trouvent dans de nombreux ouvrages statistiques. Si F expérimental ( $V_A/V_r$ ) est supérieur à F théorique (table), alors l'effet est significatif.

### III.7 conclusion

Dans ce chapitre présenté la méthode de plan d'expérience, ainsi que les différentes formules mathématiques et les méthodes existant afin de réaliser un plan d'expérience.

# Chapitre IV



### Introduction

Dans ce chapitre on présente les différents matériaux utilisés ; ainsi que leurs Caractéristiques, entrant dans la composition des mortiers à confectionner et cela par des essais au laboratoire.

### Les matériaux utilisés

- Sable préparé selon la norme [EN 196-1]
- Eau de gâchage (l'eau distillée).
- Activant (KOH et NAOH au niveau LAVARGE Hammam Dalâa wilaya de M'SILA.
- Le ciment CRS de la cimenterie LAFARGE de Hammam Dalâa wilaya de M'SILA.

### Lieu de préparation

Les essais de caractérisation des matériaux utilisée ont été réalisés au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed Boudiaf ; M'sila.
- Laboratoire de département de Chimie de l'université Mohamed Boudiaf ; M'sila.
- Laboratoire chimique et mécanique de la cimenterie LAFARGE.

### IV.1 Ciments

Dans cette étude, on utilise ciment résistant aux sulfates CEM I 42,5 N SR3 selon les norme (EN 196-1).

Ils Proviennent de la cimenterie LAFARGE Hammam Dalâa (M'sila).

Le Tableau IV.1 présente le type de ciment et le degré de finesse utilisé.

Ciment	Finesse (SSB)(cm <sup>2</sup> /g)
CEM I 42,5 N SR3	3290

**Tableau IV. 1** : Type ciment utilisé CEM I 42,5 N SR3

### IV.1.1 Analyse chimique des ciments

Les analyses chimiques pour les ciments préparés ont été effectuées à la Cimenterie de « LAFARGE Hammam Dalâa » Wilaya de M'sila [Certificat, 2021].

#### a - Composition chimique

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO%	MgO%	K <sub>2</sub> O%	Na <sub>2</sub> O%	SO <sub>3</sub> %	PAF%
20.41	3.80	4.82	63.41	1.88	0.56	0.06	2.47	0.62

Tableau IV.2: Composition chimique du clinker.

#### b - Composition minéralogique

Équations de Bogue :

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3 CaO$$

$$C_2S = 8,6 SiO_2 + 1,08 Fe_2O_3 + 5,07 Al_2O_3 - 3,07$$

$$C_3S = 4,07 CaO - 7,6 SiO_2 - 1,43 Fe_2O_3 - 6,72 Al_2O_3 - 2,85 SO_3$$

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
62.64	12.52	2.16	14.73

Tableau IV.3: Composition minéralogique du Clinker selon la formule de BOGUE.

### II.1.2 Analyse physico-mécanique de ciment

Analyse physico-mécanique de Ciment						
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	M, V app (g/l)	E/C	DP	FP	C2J	C28J
3290,00	1039,20	27.8	210	300	21,30	49,10

Tableau IV.4: Analyse physico-mécanique de ciment.

### IV.2 Activant

En utilisant des solutions alcalines (Noah, KOH) (L'hydroxyde de sodium et L'hydroxyde de potassium) à des dosages différents de 0, 1.5 et 3 %.



Figure IV.1: l'hydroxyde de sodium et l'hydroxyde de potassium (NaOH, KOH)

### IV.3 Sable

Deux types de sable ont été utilisé :

- Un sable normalisé certifié CEN, EN 196-1,
- Un sable de dune provient de oued souf

#### IV.3.1. Analyse granulométrique par tamisage [EN 933-1]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon de sable. Les résultats de l'analyse granulométrique de sable d'Oued Souf ont représentés dans le tableau IV.5:

Tamis (mm)	Refus (moy)	Refus cumulé(g)	Refus (%)	Tamisât(%)
5	0,6	0,6	0,04	99,96
2,5	12,6	13,2	0,88	99,12
1,25	59,43	72,63	4,84	95,15
0,63	358,23	430,86	28,72	71,27
0,315	738,1	1168,96	77,93	22,06
0,16	127,1	1296,06	86,40	13,59
0,08	199,9	1495,96	99,73	0,26
Fond	3,36	1499,33	99,95	0,04

**Tableau IV. 5 :** Analyse granulométrique de sable de dune.

#### IV.3.2. Les caractéristiques physiques des sables

Les résultats de caractéristique de sable obtenus sont classés dans le tableau IV.6

Sable	$\rho_{\text{abs}}(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_{\text{app}}(\text{g/cm}^3)$	ES <sub>vis</sub>	ES <sub>pis</sub>
Ouedsouf	2,55	1,62	79,15	78,16

**Tableau IV. 6 :** caractéristique de sable

$\rho_{abs}$  : La masse volumique absolue [EN 1097].

$\gamma_{app}$  : La masse volumique apparente [EN 1097].

ES : Equivalent de sable : [EN 933-8].

### IV.4. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau distillée.

### IV.5 La confection de mortier

Les essais sont conduits dans une salle à température de  $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  conformément à la norme [EN, 2006]. Tous les matériaux sont placés dans la salle à  $20^{\circ}\text{C}$  au moins 24 heures avant la fabrication sont gâchées avec de l'eau suivant les compositions pondérales normalisés ( $C/S = 1/3$ ,  $E/C=0.5$ ) tableau IV.7:

Ciment(g)	Sable (g)	Eau (g)
450	1350	225

**Tableau IV. 7 :** Compositions du mortier normal

#### IV.5.1 Préparation des mélanges

##### IV.5.1.1 Activation chimique

Pour l'activation chimique Le ciment est activé par deux solutions alcalines, l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages (0,1.5et 3%) L'activation chimiques par (NaOH et KOH) sont préparées, en ajoutant une quantité d'eau distillé au composé concentré d'une façon à obtenir la densité de la solution utilisée. Les solutions sont mélangées avec l'eau de gâchage. Le tableau IV.8. Regroupe les différents mélanges préparés pour l'activation chimique pour les deux sables.

NB : dans notre de programme d'essai on a opté pour une fraction de sable 0-2 mm (recommande par laboratoire lafarge).

MELANGE	Activant				Ciment	Sable	Eau
	NaOH		KOH				
	%	(g)	%	(g)	(g)	(g)	(g)
MSN	0	0	0	0	450	1350	225,00
	1,5	6,75	0	0			218,25
	3	13,5	0	0			211,50
	0	0	1,5	6,75			218,25
	0	0	3	13,5			211,50
MSD	0	0	0	0	450	1350	225,00
	1,5	6,75	0	0			218,25
	3	13,5	0	0			211,50
	0	0	1,5	6,75			218,25
	0	0	3	13,5			211,50

**Tableau IV. 8** les différents mélanges préparés pour l'activation chimique pour les deux sables.

MSN = mélange sable normalise.  
 MSD = mélange sable oued souf dune.

#### **IV5.2 Malaxage de mortier**

Les constituants anhydres sont pesés puis introduits dans le bol du malaxeur, un premier malaxage de 30 secondes à faible vitesse est effectué pour homogénéiser ces constituants solides. L'eau est ensuite introduite pendant 15 secondes en maintenant le malaxage à faible vitesse. Le mélange est arrêté pendant 1 min et 30 s pour décoller du bol du malaxeur tout le mortier qui y adhère. Le malaxage est ensuite repris 1 min et 30 s à grande vitesse.

La séquence de malaxage adoptée n'a pas varié. Le malaxeur utilise est un malaxeur automatique a pales conforme à la norme [EN 196-1].



**Figure IV. 3:** Malaxeur semi-automatique  
De mortier (Laboratoire de lafargeholcim M'sila)



**Figure IV. 2:** Eprouvette prismatique  
4x4x16 (Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

### VI.5.3 Fabrication des éprouvettes

Après le malaxage, le mortier obtenu est ensuite placé en deux couches dans un moule métallique constitué de 3 compartiments permettant la réalisation de 3 éprouvettes 4 cm x 4 cm x 16 cm. La mise en place du mortier est réalisée par l'intermédiaire d'une table vibrante automatique par deux couches. Ensuite, les moules sont protégées par une plaque plastique afin d'éviter tout échange hydrique avec l'extérieur et conservées à une température ambiante de 20°C.



**Figure IV. 4 :** Table vibrante automatique  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)



**Figure IV. 5 :** Plaque de protéger  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)



**Figure IV.6:** La Chambre d'humidité 20°C  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

#### IV.5.4 Conservation des éprouvettes

Le démoulage est effectué à 24 heures ; Immerger sans tarder, les éprouvettes dans un bain d'eau de température  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  jusqu'à la période de l'essai pour les tests mécaniques (flexion et compression).



**Figure IV. 7 :** Conservation des éprouvettes dans l'eau. ( $20^\circ\text{C} \pm 1$ )  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

### IV.5.5 Essais sur mortiers

#### IV.5.5.1 Essai de consistance

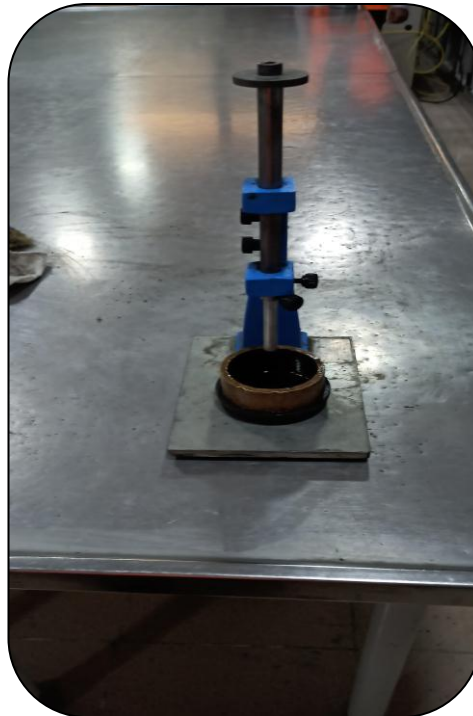
La consistance de la pâte de ciment (pourcentage d'eau/pâte pure) caractérise sa fluidité.

##### Objectif de l'essai

Déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage qui définit une telle consistance dite « Consistance normalisée ». La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps.

##### Principe de l'essai

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement, dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.



**Figure IV. 8 :** L'appareil de Vicat.  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

#### IV.5.5.2 Essais de prise

##### Objectif de l'essai

Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés Conformément à la norme EN 196 3.

**Principe de l'essai**

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation Relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement.

L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérer l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que **d = 4 mm**

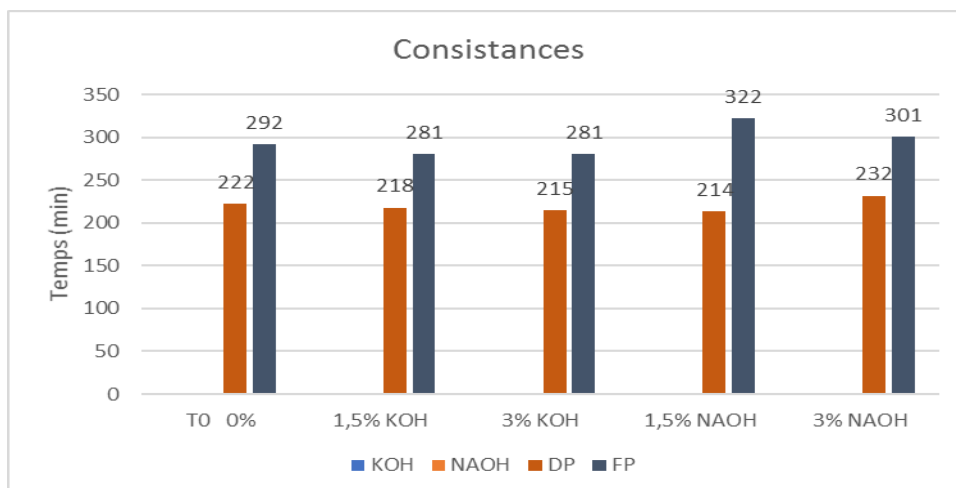
La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.



**Figure IV. 9** : L'appareil de Vicat automatique.  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

CIMENT	KOH	NAOH	E/C	Cons	DP	FP
<b>MOKAOUM CEMI/ 42.5 N</b>	0%	0%	28,4	4	222	292
	1,50%	0%	28,4	4	218	281
	3%	0%	28,3	4	215	281
	0%	1,50%	29	4	214	322
	0%	3%	29	4	232	301

**Tableau VI. 9** : Consistances normales, temps de prise de ciment activant chimique



**Figure VI. 10** : Consistances normales, temps de prise de ciment activant chimique

### IV.5.5.3 Les essais sur le mortier durci

#### IV.5.5.3.1 Les essais de la résistance mécanique

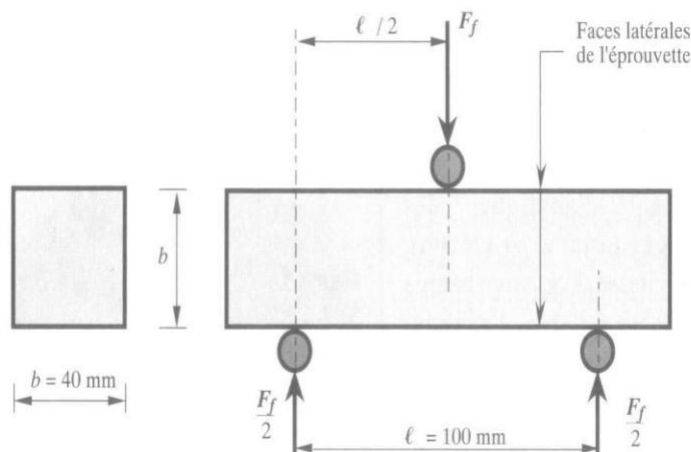
- Les essais les plus fréquents réalisés pour déterminer le comportement mécanique des mortiers sont l'essai de traction par flexion et l'essai à la compression.



**Figure IV. 11 :** Appareil automatique de compression et de flexion des mortiers.  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

#### IV.5.5.3.2 La résistance à la flexion NORME (EN 196-1) :

- 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.
- L'essai est dit l'essai de flexion 3 points, réalisé sur des prismes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Le protocole suivi est celui de la norme EN 12390-5 (figure IV.12).



**Figure IV. 12 :** Principe de la flexion sur prisme.

Le bâti et l'échantillon sont installés au centre de la presse. Au cours de l'essai, la presse est programmée et pilotée en force à une vitesse de 10 N/s. L'échantillon subit une force qui est répartie inégalement sur la face supérieure. La répartition des contraintes est linéaire dans l'échantillon, la contrainte de traction étant maximale en face inférieure et pour une certaine valeur de contrainte, il y a rupture de l'éprouvette.

La presse enregistre au cours de l'essai la force ( $F_f$ ) en (N) et le déplacement de sa traverse en [mm]. Lors du dépouillement de l'essai, la résistance à la traction par flexion ( $R_f$ ) est déterminée grâce à l'équation :

$$R_f = (1,5 \times F_f \times L) / b^3$$

Où :

- $R_f$  : la résistance à la flexion en MPa.
- $F_f$  : c'est l'effort maximal de compression en (N).
- $L$  : la distance entre les appuis du bâti de flexion en (mm).
- $b$  : largeur du prisme en (mm).



**Figure IV. 13 :** Essai de flexion.  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

### IV.5.5.3.3 La résistance à la compression NORME (EN 196-1)

L'essai est effectué sur les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion, ils sont écrasés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm. Les prismes sont testés en compression simple à l'aide d'un dispositif spécifique à la compression suivant la norme EN 196-1.

- Le prisme est soumis à une force de compression jusqu'à la rupture. Pour cela, la presse est pilotée en déplacement à une vitesse de 500 $\mu$ m/s. Cette vitesse correspond à la vitesse imposée pour les mortiers normalisés. Le principe de l'essai de compression sur demi-prisme est donné par la figure IV.14.

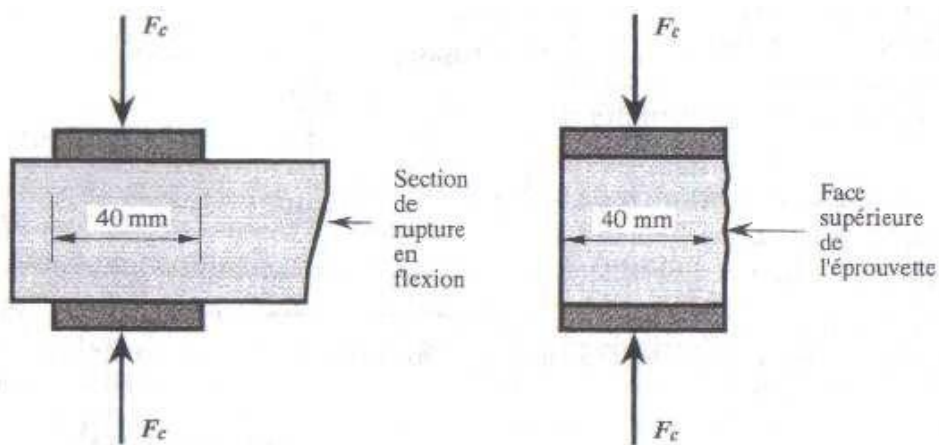


Figure IV. 14 : Le principe de l'essai à la compression du mortier.



Figure IV. 15 : Epreuve testée en compression.  
(Laboratoire de lafargeholcim M'sila)

- Pour déterminer la résistance à la compression (**R<sub>c</sub>**), obtenue sur chaque prisme, la valeur de force maximale (**F<sub>c</sub>**) est relevée et elle est introduite dans la formule suivant :

$$R_c = F_c (\text{max})/S$$

Où :

- **S**: est la section initiale du prisme (40 x 40 mm<sup>2</sup>).
- **F<sub>c</sub>**: est la force maximale de compression en (N).

**R<sub>c</sub>** : la résistance à la compression en (MPa).

### IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait des essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux et la préparation des mélanges.

# Chapitre V



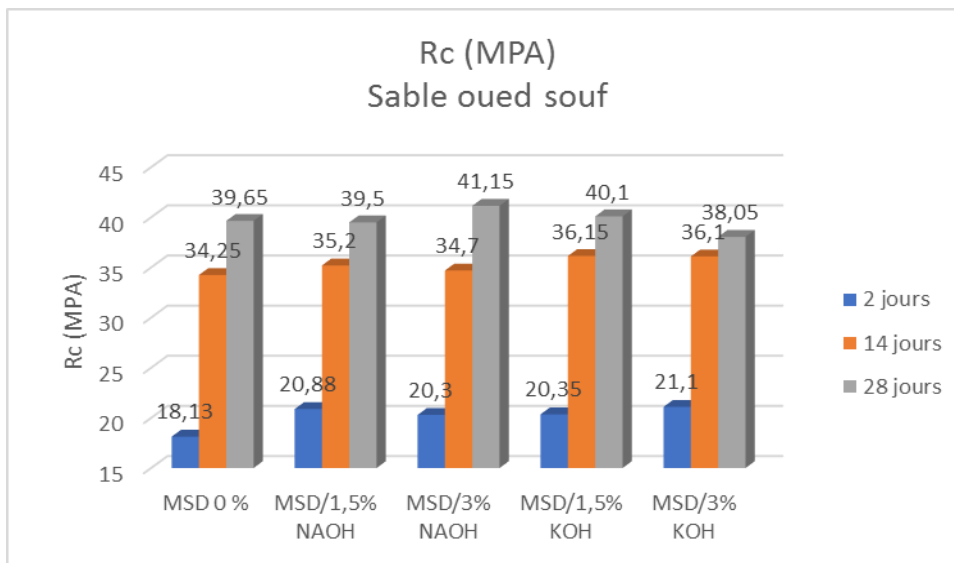
## Introduction

Ce chapitre regroupe l'essentiel des résultats obtenus du programme expérimental sur les différents mortiers étudiés avec deux types de sable (sable de dune oued souf et un sable normalisé) sur les propriétés physiques et mécaniques de mortier activé par des alcalins (NaOH et KOH).

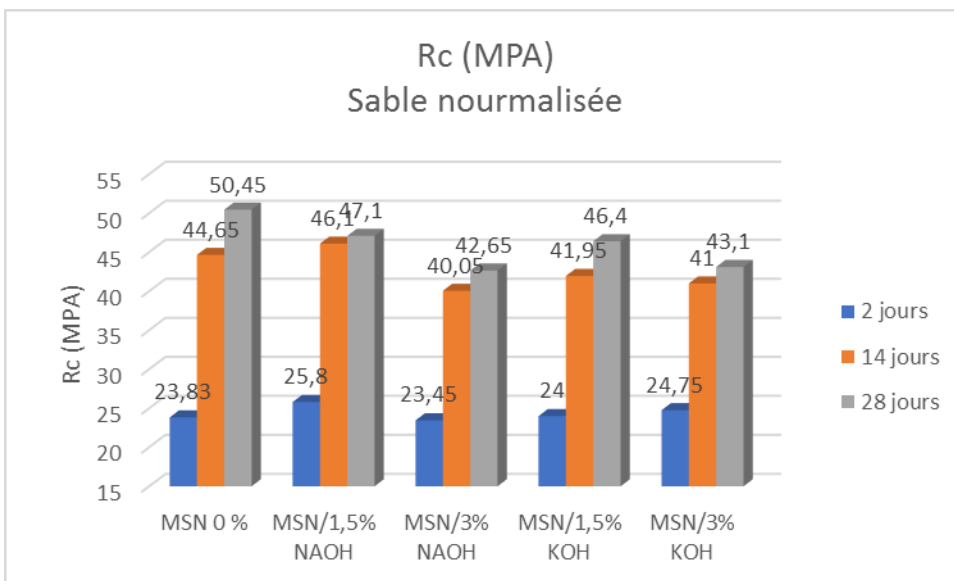
### V.1 Effet de type de sable

#### V.1.1 La résistance à la compression

Dans cette partie deux types de sable ont été utilisées afin d'avoir l'effet de sable (sable de dune oued souf et un sable normalisé) sur le comportement mécanique de mortier activé par des alcalins (NaOH et KOH).



**Figure V. 1 :** l'évolution de la résistance à la compression en fonction de type d'activant sable d'oued souf



**Figure V. 2 :** l'évolution de la résistance à la compression en fonction de type d'activant sable de normalisée

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

Les figures V.1 et V2 présentent l'évolution de la résistance à la compression en fonction de type d'activant et de temps pour les deux types de sable

Le même développement de la résistance a été constaté pour les deux activant figure V.1 et V.2

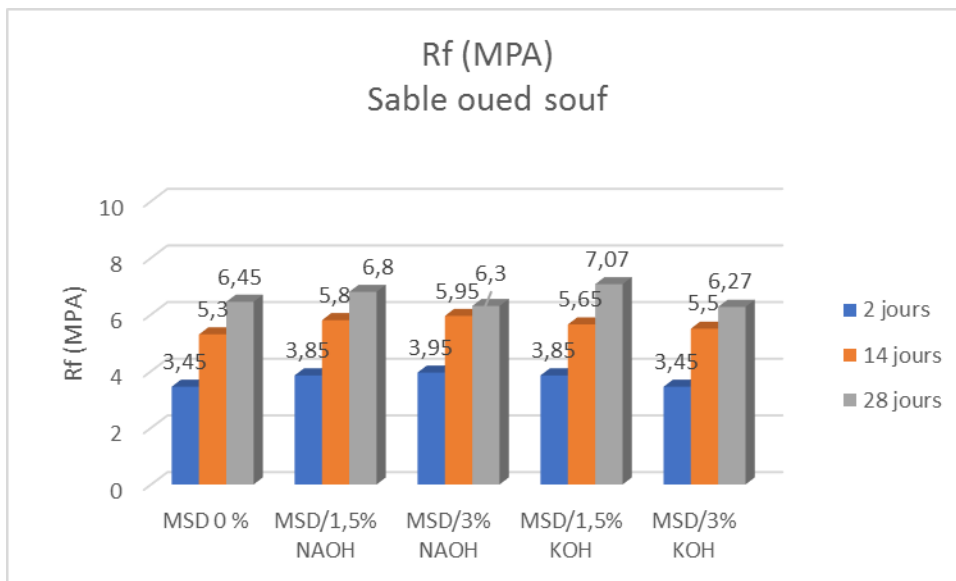
Cependant, l'activant KOH présente les meilleures valeurs à jeune âge de 2 jours.

La résistance  $R_c$  maximale a été constaté pour le mélange avec 3% de NaOH a 28 jours, Pour le sable normalisé l'activant avec 1.5% de NaOH présente les meilleures valeurs à jeune âge de 2 jours.

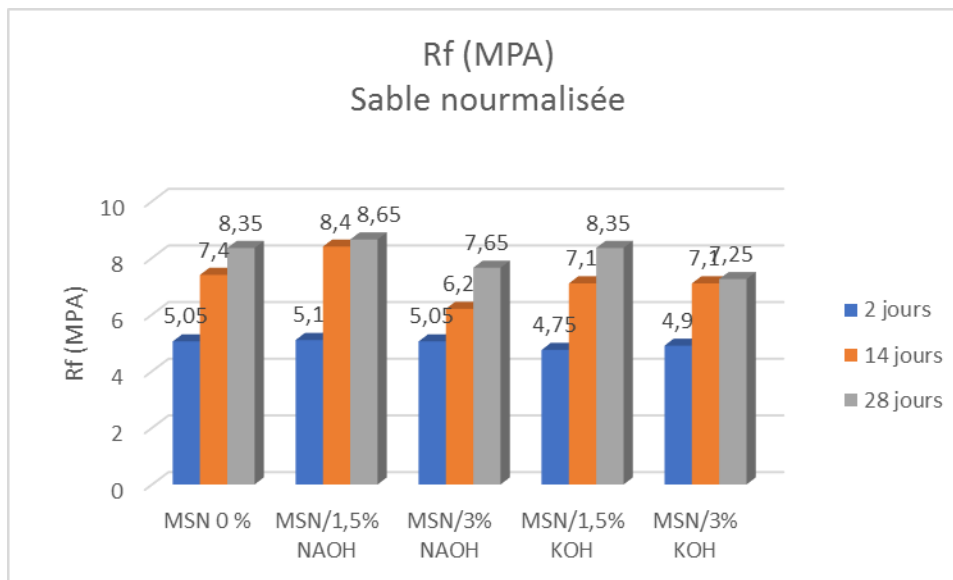
Les résistances maximales  $R_c$  ont été constaté pour les mélanges avec 1.5 % de NaOH et 1.5 % KOH 47.1 MPa et 46.4 MPa, respectivement, les résultats obtenus dans la présente étude son en corrélation avec ceux trouvés dans des recherches antédentes. [Belagraa et al, 2020]

## V.1.2 La résistance à la flexion

La résistance à la flexion ( $R_f$ ) n'est pas aussi importante par rapport à la résistance à la compression, néanmoins on s'intéresse à l'effet d'activation chimique sur cette propriété. Les figures V.3 et V4 présentent l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de type d'activant et de temps pour les deux types de sable



**Figure V. 3 :** l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de type d'activant sable de oued souf



**Figure V. 4:** l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de type d'activant sable normalisée.

Pour le sable de dune l'activant avec 1.5% et 3% de NaOH présente les meilleures valeurs à jeune âge de 2 jours.

Les résistances maximales  $R_f$  ont été constaté pour les mélanges avec 1.5 % de KOH et 3 % NaOH 7.07 MPa et 6.8 MPa, respectivement.

On remarque que le 1.5% et 3% avec de NaOH donnent des résultats légèrement supérieurs à ceux mélange avec KOH à jeune âge.

. Les résistances maximales  $R_f$  ont été constaté pour les mélanges avec 1.5 % de NaOH et 1.5 % KOH 8.65 MPa et 8.35 MPa, respectivement. La présente étude est en bon accord avec les résultats d'autres chercheurs sur le sujet. [Iadjal et al, 2019 ; 2020]

## V.2 Etude corrélative (Méthode JMP)

### V.2.1 Modélisation de comportement mécanique pour les ciments activés chimiquement

#### V.2.1.1 Effet de NaOH

##### V.2.1.1.1 Matrice d'expérience

Dans cette partie, nous avons pris en considération 2 facteurs qui sont le type et le pourcentage d'activant.

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

Deux réponses ont été étudiées dans cette partie afin de bien comprendre le comportement mécanique de mortier après activation chimique et mécanique de ciment

Ces réponses sont l'évolution de la résistance mécanique à la compression et à la flexion,

Le tableau V.1 présente la matrice d'expériences et les résultats expérimentaux pour les deux facteurs : NaOH avec différent pourcentage et le type de sable, les réponses sont présentées par la résistance en compression et à la flexion de 2, 14 et 28 jours.

Mélange	Sable	Flexion			Compression		
		2 jours	14 jours	28 jours	2 jours	14 jours	28 jours
0%	Sable normalisée	5,05	7,4	8,35	23,83	44,65	50,45
1,5% NaOH	Sable normalisée	5,1	8,4	8,65	25,80	46,1	47,1
3% NaOH	Sable normalisée	5,05	6,2	7,65	23,45	40,05	42,65
0%	Sable de dune	3,45	5,3	6,45	18,13	34,25	39,65
1,5% NaOH	Sable de dune	3,85	5,8	6,8	20,88	35,2	39,5
3% NaOH	Sable de dune	3,95	5,95	6,3	20,30	34,7	41,15

Tableau V. 1 : La matrice d'expériences.

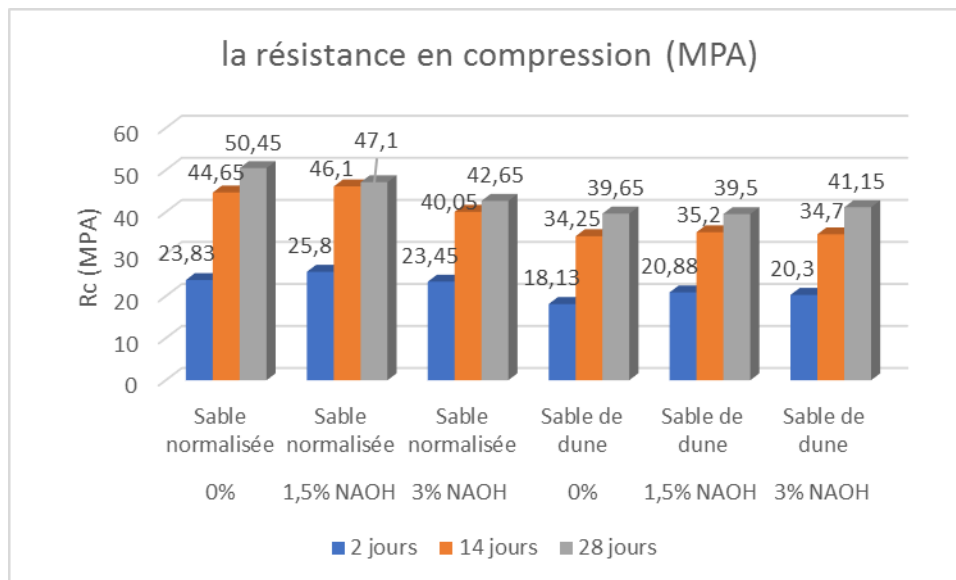
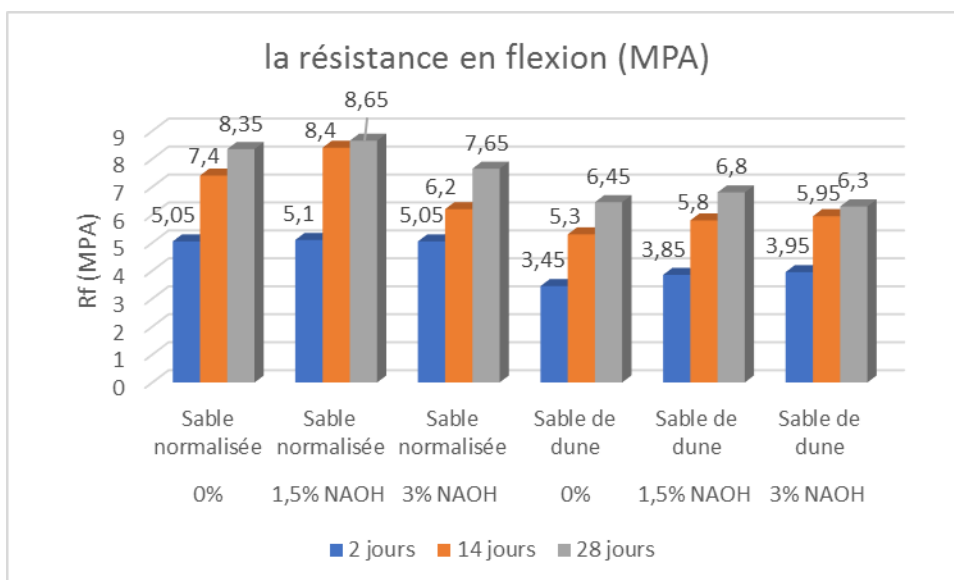


Figure V. 5 : Evolution de la résistance en compression à (2,14 et 28 jours)

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure V. 6 :** Evolution de la résistance en flexion à (2,14 et 28 jours)

Les figures V.5, V.6 regroupent les résistances à la compression et à la flexion obtenue à 2, 14 et 28 jours pour l'ensemble des mortiers testés. D'après ces figures, on peut remarquer une augmentation différente de la résistance à la compression et flexion entre 2,14 et 28 jours pour tous les mélanges.

Cela peut montrer que la cinétique d'hydratation des mélanges étudié influencé fortement par le dosage d'activant.

Pour le sable normalisé l'activant avec 1.5 % de NaOH présente les meilleures valeurs à jeune âge de 2 jours.

La résistance maximale  $R_c$  a été constatée pour les mélanges avec 1.5 % de NaOH 47.1 MPa.

La résistance à la flexion ( $R_f$ ) n'est pas aussi importante par rapport à la résistance à la compression, néanmoins on s'intéresse à l'effet d'activation chimique sur cette propriété. La figure V.6 présente l'évolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage d'activant et de temps

Nous pouvons remarquer que les mortiers activés avec cette base de sodium donnent des résultats légèrement supérieurs jeune âge, à 28 jours le NaOH avec 1.5% présente la meilleure activation et particulièrement pour deux sables.

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

## V.2.1.1.2 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours

Lorsque l'on trace les valeurs observées du modèle quadratique en fonction des valeurs prévues (c'est-à-dire la relation entre la zone prévue et la zone réellement mesuré) (Figure V.7), On constate que les points sont proches à la première bissectrice qui est souhaitable.

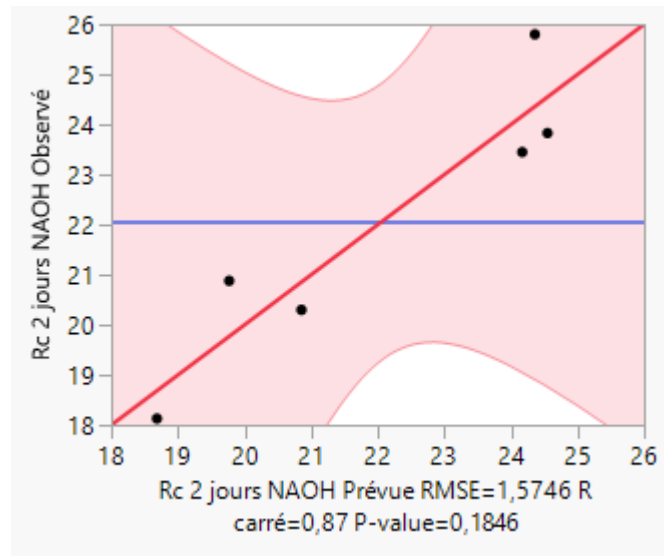


Figure V. 7 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

### Résumé de l'ajustement

Le tableau V.2 regroupe les résultats de l'ajustement de module de la résistance en compression en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable. D'après les résultats de l'ajustement on

Constata que La qualité descriptive du modèle mathématique est bonne car les valeurs de ( $R^2$  et  $R^2$  ajusté) sont égale à 087 et 0.68 respectivement.

R carré	0,872816
R carré ajusté	0,682041
Racine de l'erreur quadratique moyenne	1,574571
Moyenne de la réponse	22,065
Observations (ou sommes pondérées)	6

Tableau V. 2: Résumé de l'ajustement

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

## Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	2,295	0,642816	3,57	0,0703
NAOH	0,4475	0,787286	0,57	0,6271
Sable*NAOH	-0,6375	0,787286	-0,81	0,5031

**Tableau V. 3** : Estimations des coefficients triés

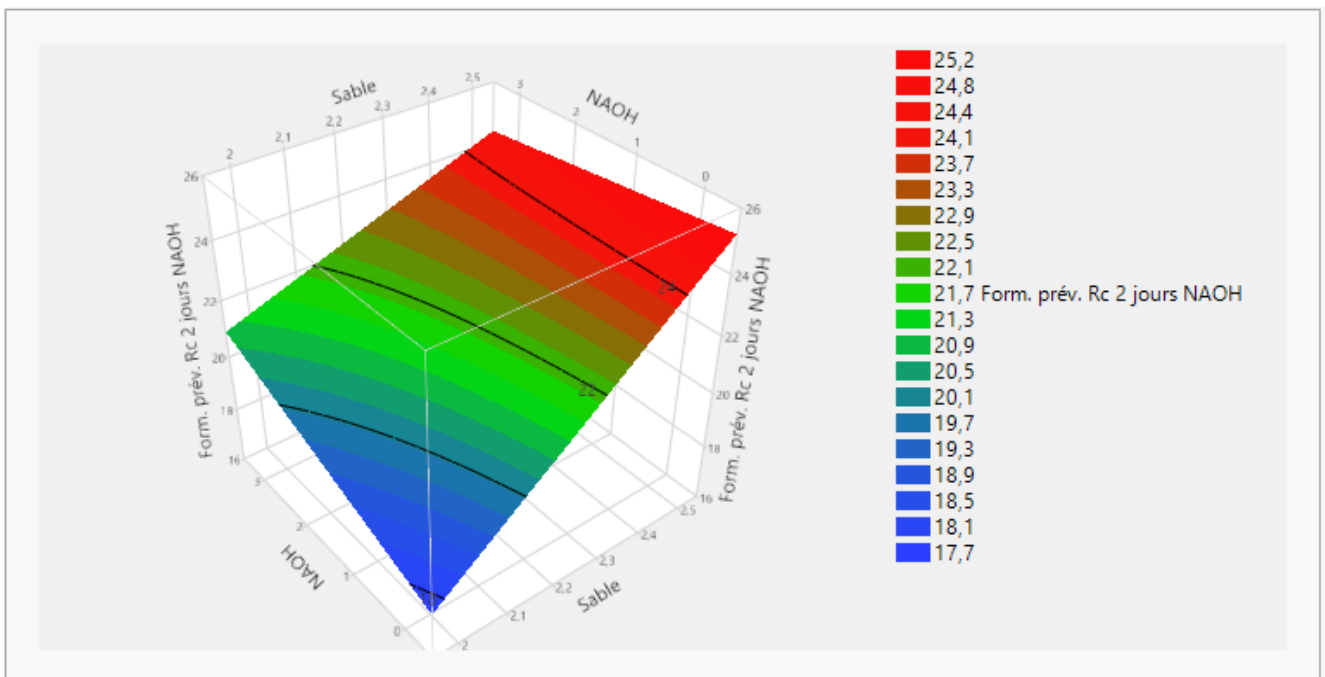
D'après le tableau V.3 d'estimation de coefficients tirés ; l'effet de type de sable est beaucoup plus important que l'effet de pourcentage de (NaOH) et l'interaction le type de sable et pourcentage de (NaOH). Afin de simplifier le modèle nous allons donc éliminer ce terme de l'équation. Donc la réponse de résistance à la compression.

Peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$22.065 + 2.295 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + 0.4475 \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) * -0.6375 \right)$$

D'après cette figure V.8 on peut remarquer clairement que le type de sable et le dosage de NaOH influent fortement sur la résistance mécanique à la compression.

Une augmentation de la résistance en compression à été observée avec l'augmentation de pourcentage de NaOH et le type de sable.



**Figure V. 8** : L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable.

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

### V.2.1.1.3 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours

D'après le graphe des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, on peut observer que tous les points sont proches à la première bissectrice ; cette dispersion indique la bonne qualité de modèle utilisé.

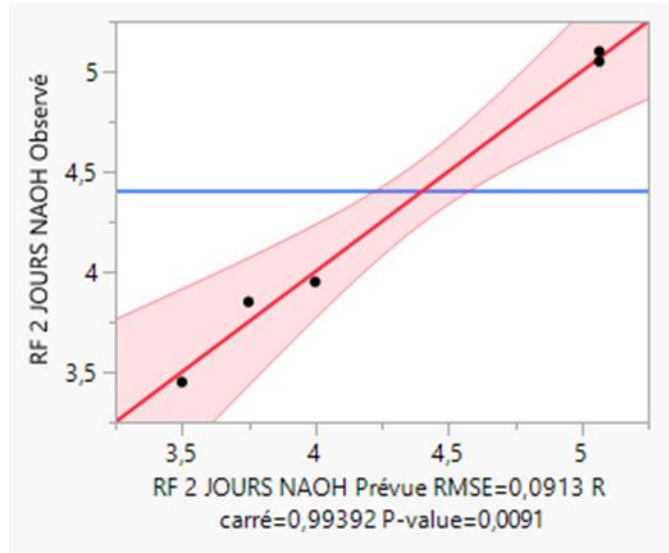


Figure V. 9: Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

D'après le tableau V.4 d'ajustement du le modèle de résistance à la flexion en fonction de pourcentage de l'activant NaOH et le type de sable on peut observer que les valeurs des deux coefficients R carré et R carré ajusté sont égale à 0.99 et 0.98, assez proche de 1 cela indique la qualité descriptive de modèle mathématiques.

R carré	0,993922
R carré ajusté	0,984805
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,091287
Moyenne de la réponse	4,408333
Observations (ou sommes pondérées)	6

Tableau V. 4 : Résumé de l'ajustement

On remarque dans le tableau V.5 l'effet de NaOH et le type de sable sont le plus influant sur la réponse de résistance à la flexion.

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

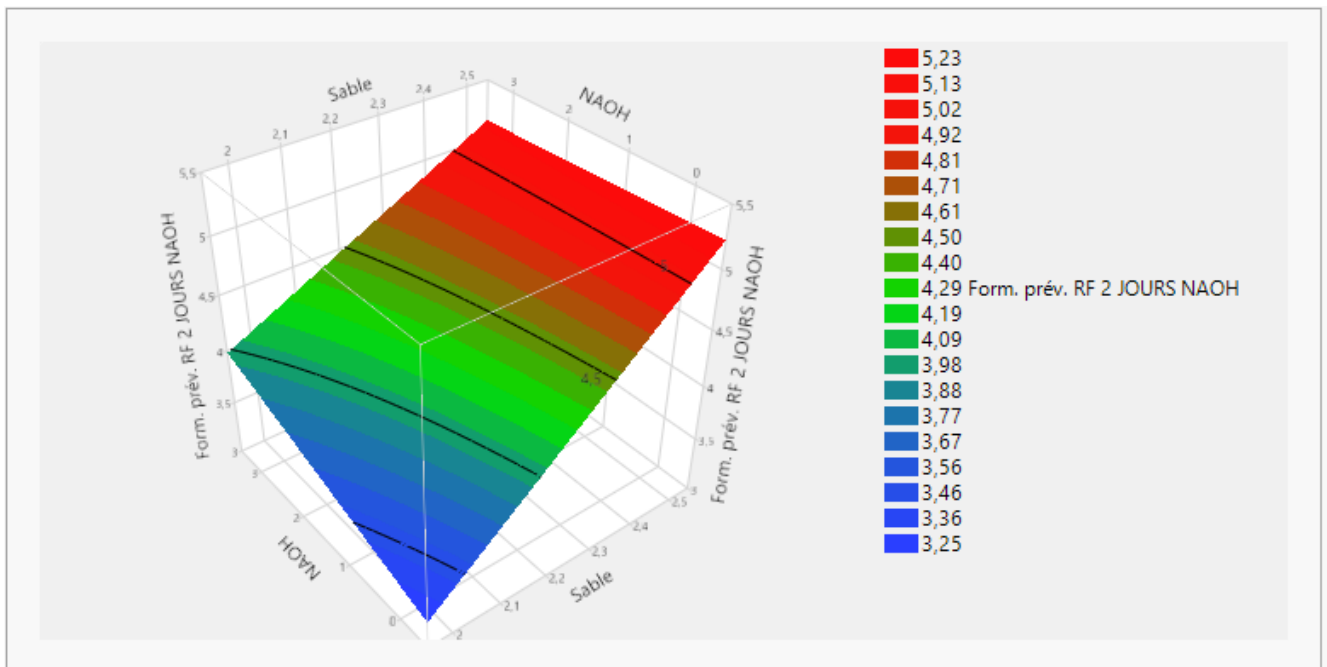
## Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	0,6583333	0,037268	17,66	0,0032*
NAOH	0,125	0,045644	2,74	0,1115
Sable*NAOH	-0,125	0,045644	-2,74	0,1115

**Tableau V. 5** : Estimation des coefficients triés.

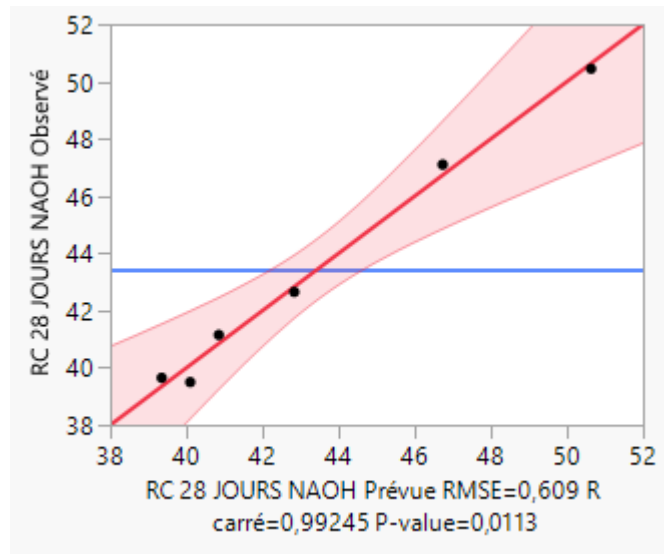
A partir de la figure V.10, on observe l'évolutions de la résistance à la flexion des mélanges confectionnés avec type de sable et un activant de NaOH avec des dosages différents. La résistance à la flexion décroît régulièrement avec de type de sable. Donc la réponse de résistance mécanique à la flexion en fonction de type de sable et de pourcentage (NaOH), peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$4.408333333 + 0.658333333 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + 0.125 \left( \frac{(NAOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(NAOH - 1.5)}{1.5} \right) * -0.125 \right)$$



**Figure V. 10** : L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable.

## V.2.1.1.4 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours



**Figure V. 11 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

Lorsque l'on trace les valeurs observées du modèle quadratique en fonction des valeurs prévues (c'est-à-dire la relation entre la zone prévue et la zone réellement mesuré) (Figure V.11), On constate que les points sont proches à la première bissectrice qui est souhaitable.

### Résumé de l'ajustement

Le tableau V.6 regroupe les résultats de l'ajustement de module de la résistance en compression en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable. D'après les résultats de l'ajustement on

constate que la qualité descriptive du modèle mathématique est bonne car les valeurs de ( $R^2$  et  $R^2$  ajusté) sont égales à 0.99 et 0.98 respectivement.

R carré	0,992454
R carré ajusté	0,981135
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,608961
Moyenne de la réponse	43,41667
Observations (ou sommes pondérées)	6

**Tableau V. 6:** Résumé de l'ajustement

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

## Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	3,3166667	0,248607	13,34	0,0056*
Sable*NAOH	-2,325	0,30448	-7,64	0,0167*
NAOH	-1,575	0,30448	-5,17	0,0354*

Tableau V. 7 : Estimations des coefficients triés

D'après le tableau V.7 d'estimation de coefficients tirés ; l'effet de type de sable est beaucoup plus important que l'effet de pourcentage de (NaOH) et l'interaction le type de sable et pourcentage de (NaOH). Afin de simplifier le modèle nous allons donc éliminer ce terme de l'équation. Donc la réponse de résistance à la compression.

Peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$43.416666667 + 3.3166666667 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + (-1.575) * \left( \frac{(NAOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(NAOH - 1.5)}{1.5} \right) * (-2.325) \right)$$

D'après cette figure V.12 on peut remarquer clairement que le type de sable et le dosage de NaOH influent fortement sur la résistance mécanique à la compression.

Une augmentation de la résistance en compression a été observée avec l'augmentation de pourcentage de NaOH et le type de sable.

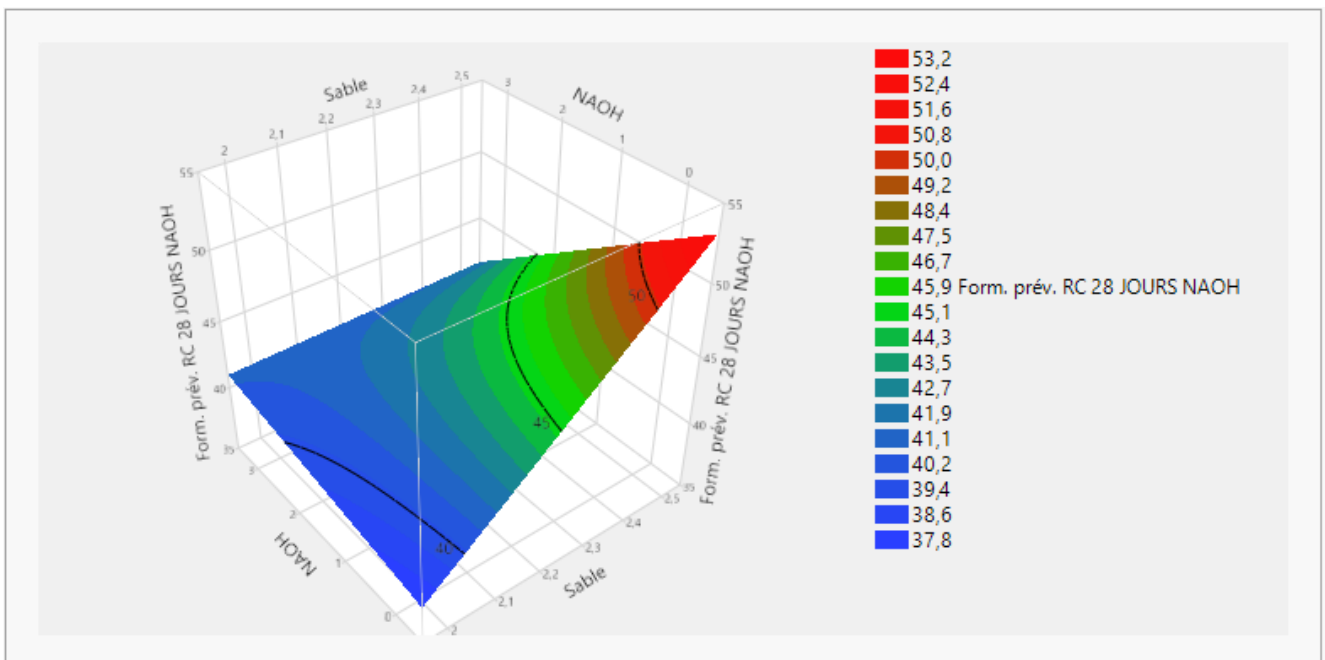
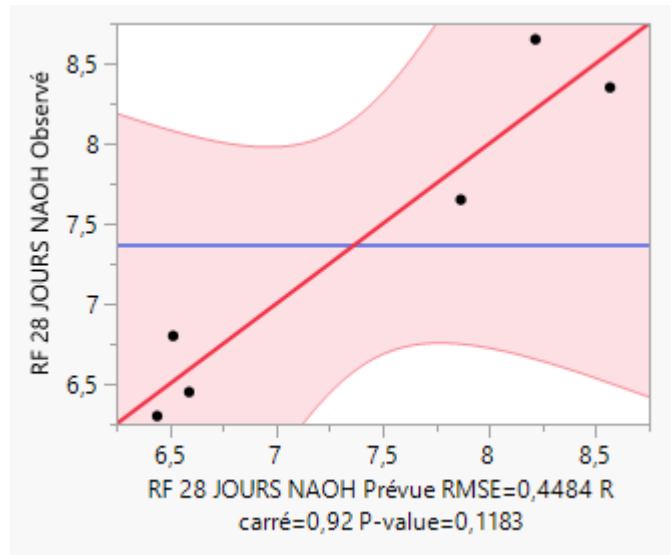


Figure V. 12 : L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable.

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

### V.2.1.1.5 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours

D'après le graphe des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, on peut observer que tous les points sont proches à la première bissectrice ; cette dispersion indique la bonne qualité de modèle utilisé.



**Figure V. 13 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

D'après le tableau V.8 d'ajustement du le modèle de résistance à la flexion en fonction de pourcentage de l'activant NaOH et le type de sable on peut observer que les valeurs des deux coefficients R carré et R carré ajusté sont égale à 0.91 et 0.79, assez proche de 1 cela indique la qualité descriptive de modèle mathématiques.

R carré	0,919476
R carré ajusté	0,79869
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,448377
Moyenne de la réponse	7,366667
Observations (ou sommes pondérées)	6

**Tableau V. 8 :** Résumé de l'ajustement

On remarque dans le tableau V.9 l'effet de NaOH et le type de sable sont le plus influant sur la réponse de résistance à la flexion.

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

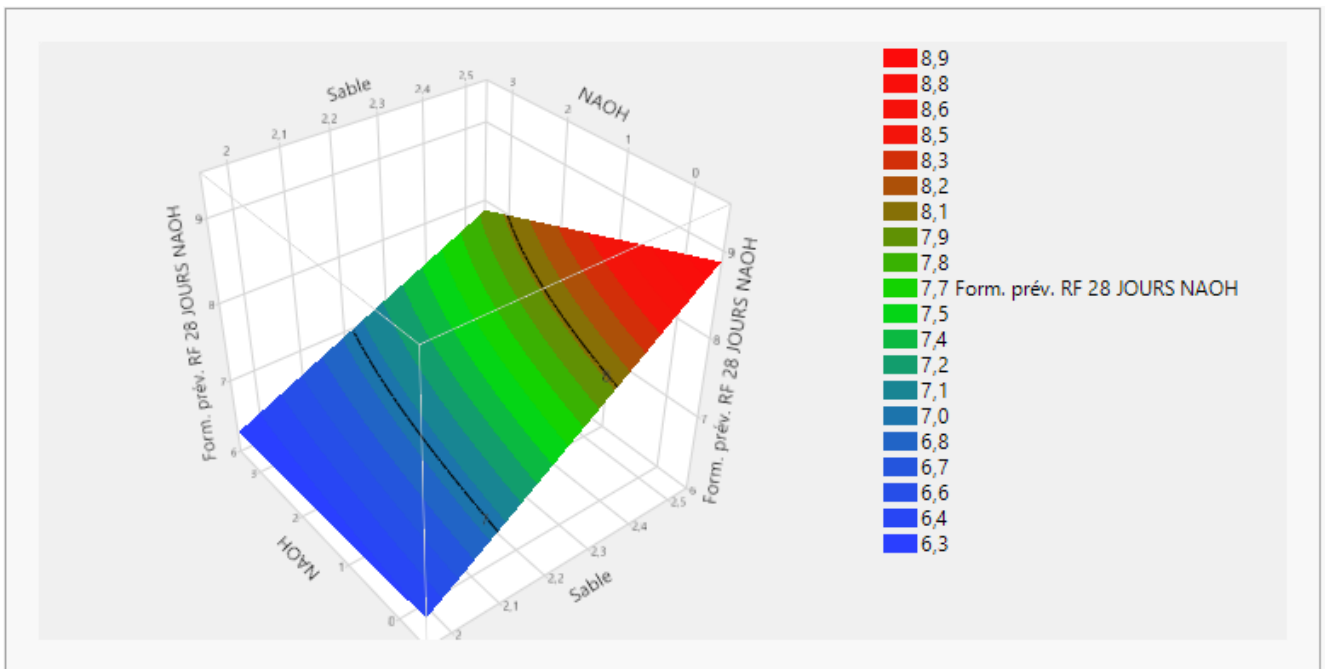
## Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	0,85	0,183049	4,64	0,0434*
NAOH	-0,2125	0,224188	-0,95	0,4432
Sable*NAOH	-0,1375	0,224188	-0,61	0,6021

**Tableau V. 9** : Estimation des coefficients triés.

A partir de la figure V.14, on observe l'évolutions de la résistance à la flexion des mélanges confectionnés avec type de sable et un activant de NaOH avec des dosages différents. La résistance à la flexion décroît régulièrement avec de type de sable. Donc la réponse de résistance mécanique à la flexion en fonction de type de sable et de pourcentage (NaOH), peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$7.36666667 + 0.85 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + (-2.125) * \left( \frac{(NAOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(NAOH - 1.5)}{1.5} \right) * (-0.1375) \right)$$



**Figure V. 14** : L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de NaOH et le type de sable.

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

## V.2.1.2 Effet de KOH

### V.2.1.2.1 Matrice d'expérience

La matrice d'expériences tableau V.10 est fournie avec les résultats expérimentaux de la résistance mécanique à la compression et à la flexion obtenus après d'activer KOH avec différent pourcentage et le type de sable.

Mélange	Sable	Flexion			Compression		
		2 jours	14 jours	28 jours	2 jours	14 jours	28 jours
0%	Sable normalisée	5,05	7,4	8,35	23,83	44,65	50,45
1,5% KOH	Sable normalisée	4,75	7,1	8,35	24,00	41,95	46,4
3% KOH	Sable normalisée	4,9	7,1	7,25	24,75	41,00	43,1
0%	Sable de dune	3,45	5,3	6,45	18,13	34,25	39,65
1,5% KOH	Sable de dune	3,85	5,65	7,07	20,35	36,15	40,1
3% KOH	Sable de dune	3,45	5,5	6,27	21,10	36,1	38,05

Tableau V. 10 : Matrice d'expériences.

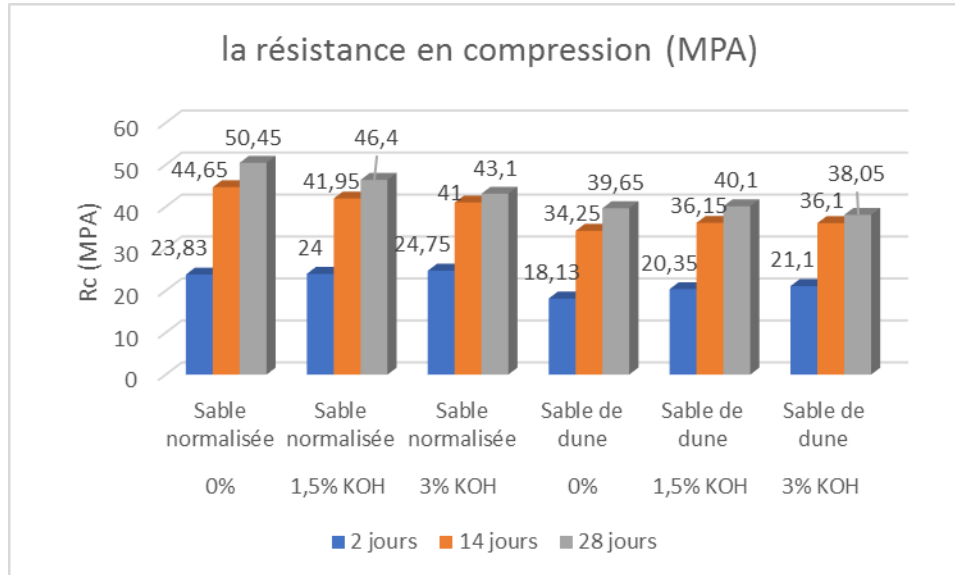
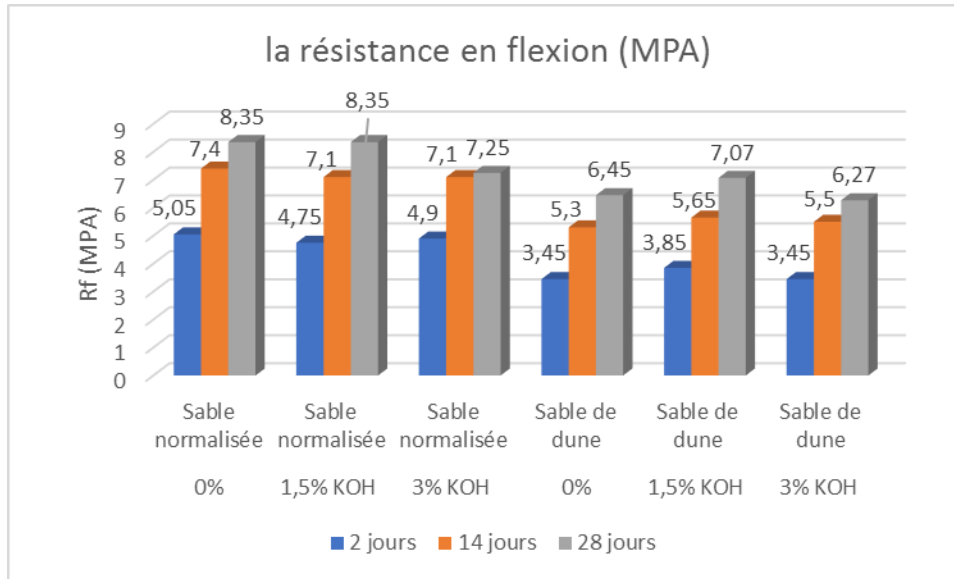


Figure V. 15 : Evolution de la résistance en compression à (2,14 et 28 jours)



**Figure V. 16 :** Evolution de la résistance en flexion à (2,14 et 28 jours)

D'après les figures V.15 et V.16 on peut remarquer que l'augmentation de dosage de KOH entraîne une modification remarquable des résistances mécaniques ( $R_c$  et  $R_f$ ).

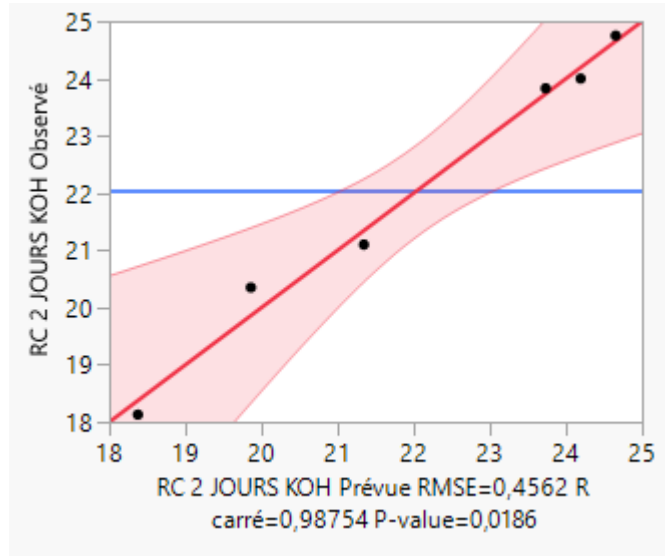
Les résistances à la compression obtenues à 2 jours de durcissement montrent que le ciment activé avec 3 % de KOH présente la meilleure performance (24.75 MPa).

A 28 jours, la résistance maximale à la compression a été constatée pour les mélanges avec 1.5 % de KOH (46.4 MPa).

Pour la résistance à la flexion, des valeurs comparées entre 3.45 et 5.05 MPa après 2 jours de conservation. A 28 jours, une augmentation remarquable pour tous les mélanges et surtout pour le mortier activé avec 1.5 % de KOH.

### V.2.1.2.2 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours

Lorsque l'on trace les valeurs observées du modèle quadratique en fonction des valeurs prévues (c'est-à-dire la relation entre la zone prévue et la zone réellement mesuré) (Figure V.17), On constate que les points sont proches à la première bissectrice qui est souhaitable.



**Figure V. 17 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

### Résumé de l'ajustement

Le tableau V.11 regroupe les résultats de l'ajustement de module de la résistance en compression en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable. D'après les résultats de l'ajustement on constate que La qualité descriptive du modèle mathématique est bonne car les valeurs de ( $R^2$  et  $R^2$  ajusté) sont égale à 0.98 et 0.96 respectivement.

R carré	0,987545
R carré ajusté	0,968861
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,456189
Moyenne de la réponse	22,02667
Observations (ou sommes pondérées)	6

**Tableau V. 11 :** Résumé de l'ajustement

### Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	2,1666667	0,186238	11,63	0,0073*
KOH	0,9725	0,228094	4,26	0,0509
Sable*KOH	-0,5125	0,228094	-2,25	0,1537

**Tableau V. 12 :** Estimations des coefficients triés

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

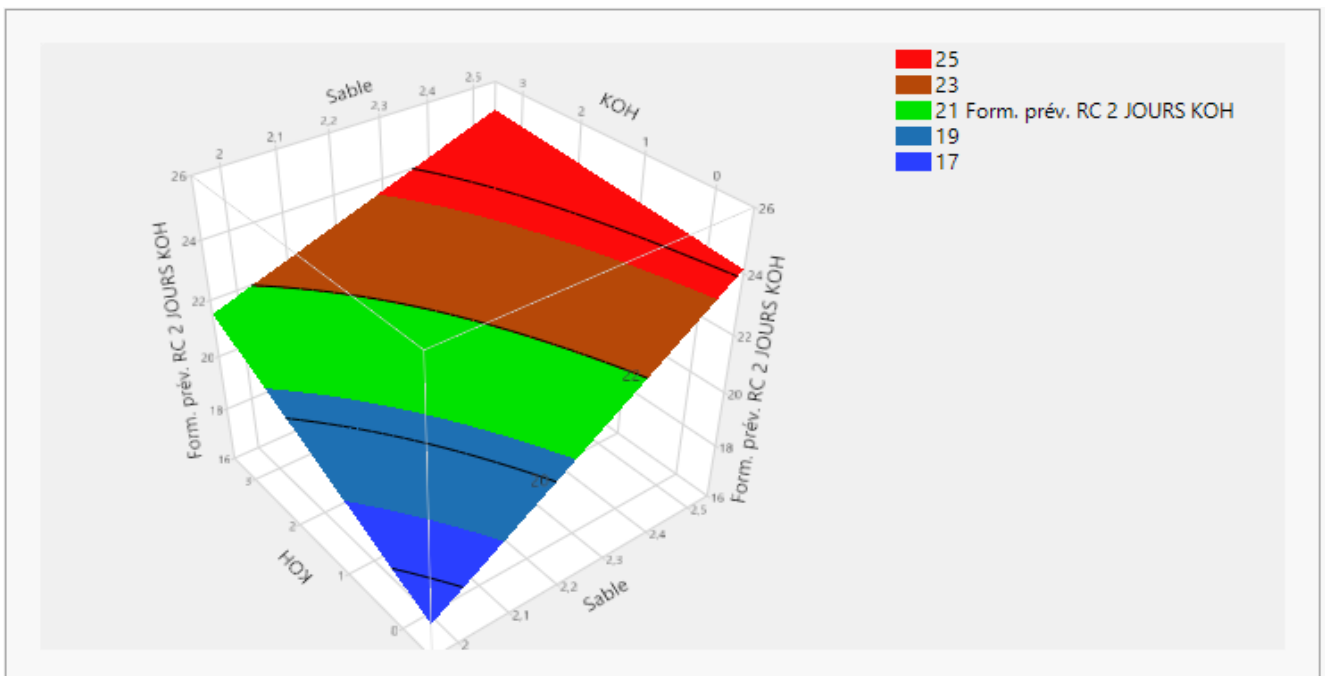
D'après le tableau V.12 d'estimation de coefficients tirés ; l'effet de type de sable est beaucoup plus important que l'effet de pourcentage de (KOH) et l'interaction le type de sable et pourcentage de (KOH). Afin de simplifier le modèle nous allons donc éliminer ce terme de l'équation. Donc la réponse de résistance à la compression.

Peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$22.026666667 + 2.1666666667 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + 0.9725 \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) * -0.5125 \right)$$

D'après cette figure V.18 on peut remarquer clairement que le type de sable et le dosage de KOH influent fortement sur la résistance mécanique à la compression.

Une augmentation de la résistance en compression a été observée avec l'augmentation de pourcentage de KOH et le type de sable.

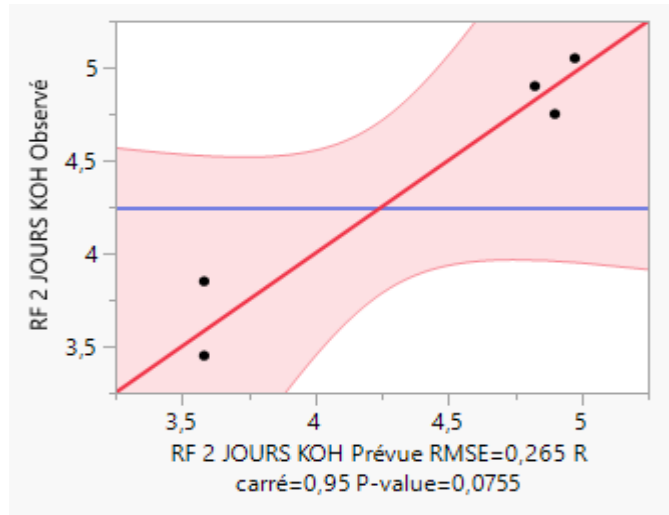


**Figure V. 18 :** L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable.

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

### V.1.2.1.3 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à jeune âge de 2 jours

D'après le graphe des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, on peut observer que tous les points sont proches à la première bissectrice ; cette dispersion indique la bonne qualité de modèle utilisé.



**Figure V. 19** : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

D'après le tableau V.13 d'ajustement du le modèle de résistance à la flexion en fonction de pourcentage de l'activant NaOH et le type de sable on peut observer que les valeurs des deux coefficients R carré et R carré ajusté sont égale à 0.94 et 0.87, assez proche de 1 cela indique la qualité descriptive de modèle mathématiques.

R carré	0,948978
R carré ajusté	0,872445
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,264969
Moyenne de la réponse	4,241667
Observations (ou sommes pondérées)	6

**Tableau V. 13** : Résumé de l'ajustement

### Estimations des coefficients triés

On remarque dans le tableau V.14 l'effet de KOH et le type de sable sont le plus influant sur la réponse de résistance à la flexion.

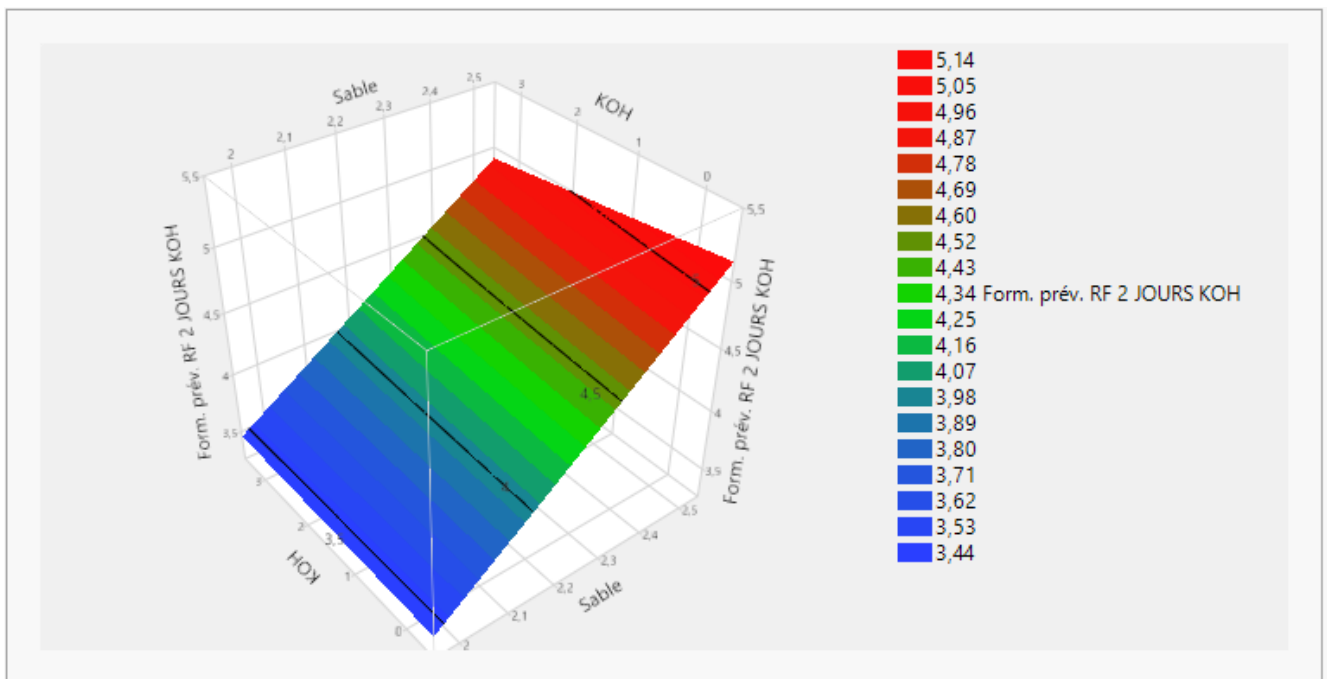
## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	0,6583333	0,108173	6,09	0,0260*
KOH	-0,0375	0,132484	-0,28	0,8037
Sable*KOH	-0,0375	0,132484	-0,28	0,8037

**Tableau V. 14** : Estimation des coefficients triés.

A partir de la figure V.20, on observe l'évolutions de la résistance à la flexion des mélanges confectionnés avec type de sable et un activant de KOH avec des dosages différents. La résistance à la flexion décroît régulièrement avec de type de sable. Donc la réponse de résistance mécanique à la flexion en fonction de type de sable et de pourcentage (KOH), peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$4.2416666667 + 0.6583333333 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + (-0.375) * \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) * (-0.0375) \right)$$



**Figure V. 20** : L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable.

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

### V.2.1.2.4 Modélisation de la résistance en compression Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours

Lorsque l'on trace les valeurs observées du modèle quadratique en fonction des valeurs prévues (c'est-à-dire la relation entre la zone prévue et la zone réellement mesuré) (Figure V.21), On constate que les points sont proches à la première bissectrice qui est souhaitable.

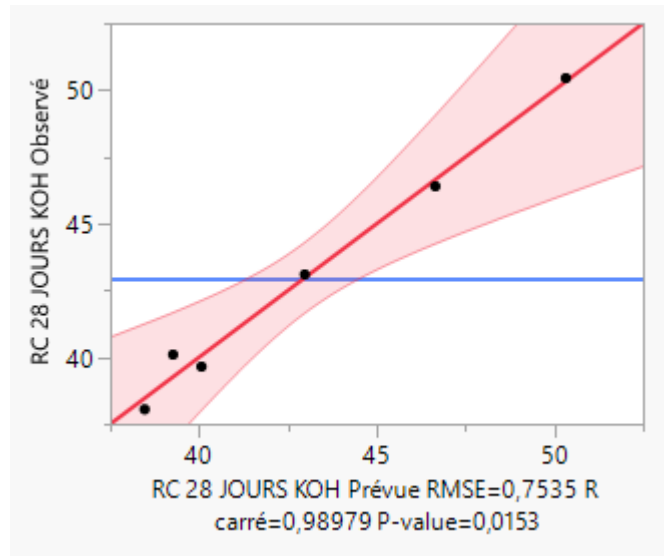


Figure V. 21 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

#### Résumé de l'ajustement

Le tableau V.15 regroupe les résultats de l'ajustement de module de la résistance en compression en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable. D'après les résultats de l'ajustement on constate que La qualité descriptive du modèle mathématique est bonne car les valeurs de ( $R^2$  et  $R^2$  ajusté) sont égale à 0.98 et 0.97 respectivement.

R carré	0,989789
R carré ajusté	0,974473
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,753464
Moyenne de la réponse	42,95833
Observations (ou sommes pondérées)	6

Tableau V. 15 : Résumé de l'ajustement

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

### Estimations des coefficients triés

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	3,6916667	0,3076	12,00	0,0069*
KOH	-2,2375	0,376732	-5,94	0,0272*
Sable*KOH	-1,4375	0,376732	-3,82	0,0623

**Tableau V. 16** : Estimations des coefficients triés

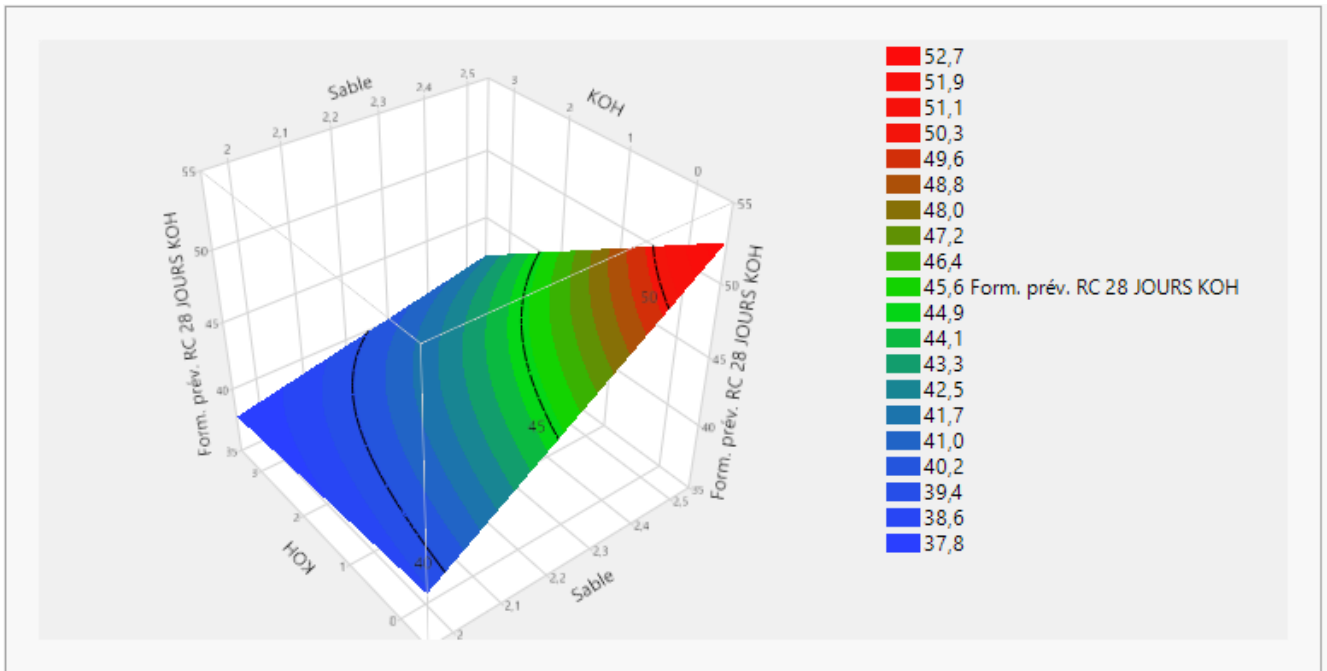
D'après le tableau V.16 d'estimation de coefficients tirés ; l'effet de type de sable est beaucoup plus important que l'effet de pourcentage de (KOH) et l'interaction le type de sable et pourcentage de (KOH). Afin de simplifier le modèle nous allons donc éliminer ce terme de l'équation. Donc la réponse de résistance à la compression.

Peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$42.958333333 + 3.691666667 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + (-2.2375) * \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) * (-1.4375) \right)$$

D'après cette figure V.22 on peut remarquer clairement que le type de sable et le dosage de KOH influent fortement sur la résistance mécanique à la compression.

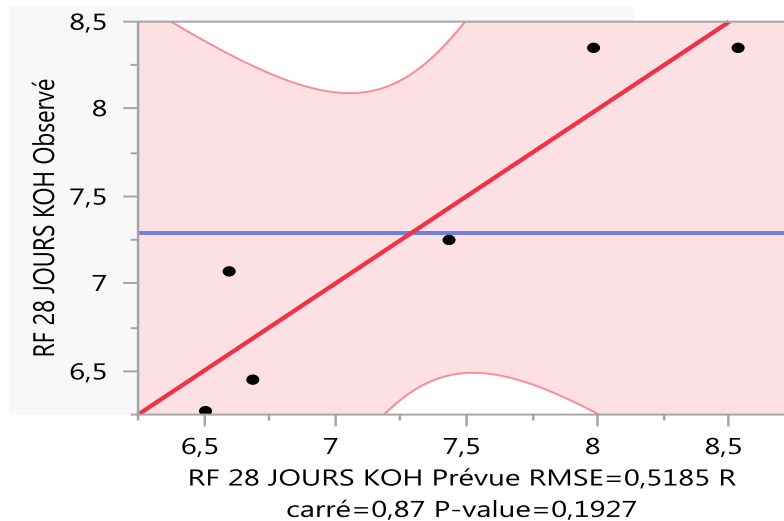
Une augmentation de la résistance en compression a été observée avec l'augmentation de pourcentage de KOH et le type de sable.



**Figure V. 22 :** L'évolution des résistances résiduelles a la compression en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable.

### V.2.1.2.5 Modélisation de la Résistance mécanique à la flexion Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 28 jours

D'après le graphe des valeurs observées en fonction des valeurs prévues, on peut observer que tous les points sont proches à la première bissectrice ; cette dispersion indique la bonne qualité de modèle utilisé.



**Figure V. 23 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

D'après le tableau V.17 d'ajustement du le modèle de résistance à la flexion en fonction de pourcentage de l'activant NaOH et le type de sable on peut observer que les valeurs des deux coefficients R carré et R carré ajusté sont égale à 0.86 et 0.66, assez proche de 1 cela indique la qualité descriptive de modèle mathématiques.

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

R carré	0,867003
R carré ajusté	0,667508
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,518524
Moyenne de la réponse	7,29
Observations (ou sommes pondérées)	6

**Tableau V. 17** : Résumé de l'ajustement

### Estimations des coefficients triés

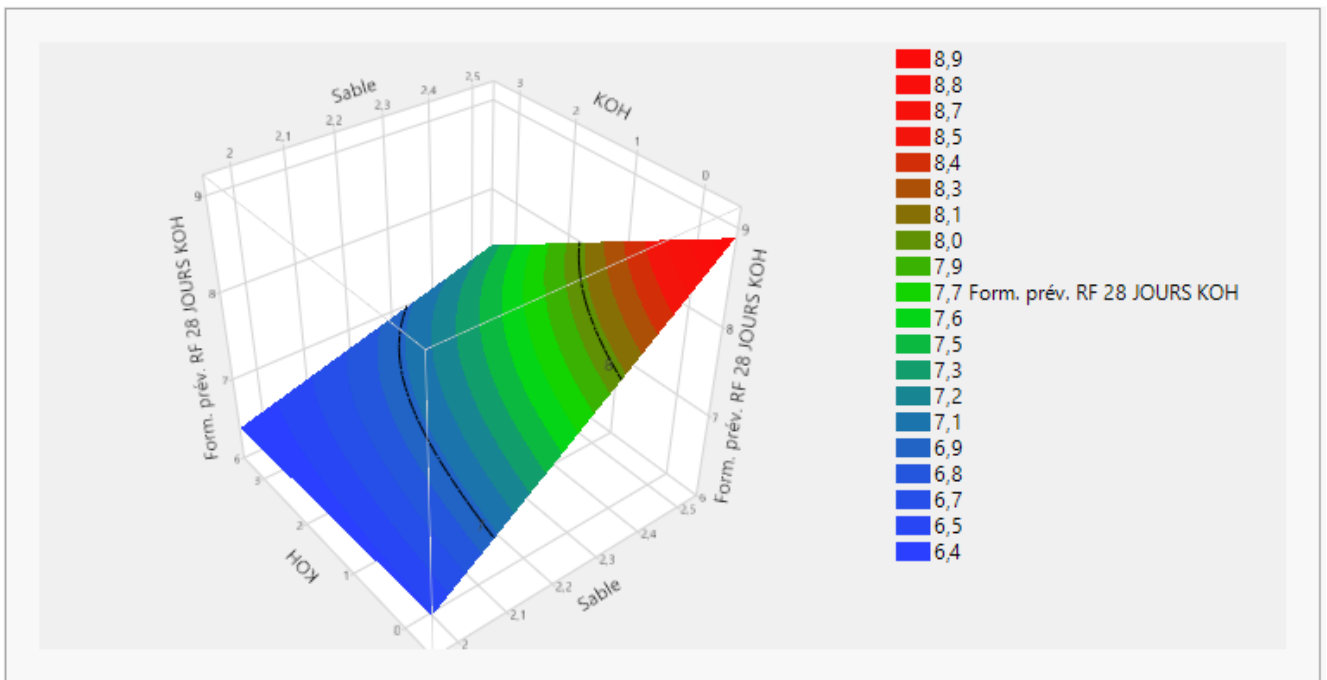
On remarque dans le tableau V.18, l'effet de KOH et le type de sable sont le plus influant sur la réponse de résistance à la flexion.

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Sable	0,6933333	0,211686	3,28	0,0819
KOH	-0,32	0,259262	-1,23	0,3425
Sable*KOH	-0,23	0,259262	-0,89	0,4686

**Tableau V. 18** : Estimation des coefficients triés.

A partir de la figure V.24, on observe l'évolutions de la résistance à la flexion des mélanges confectionnés avec type de sable et un activant de KOH avec des dosages différents. La résistance à la flexion décroît régulièrement avec le type de sable. Donc la réponse de résistance mécanique à la flexion en fonction de type de sable et de pourcentage (KOH), peut se résumer dans le modèle empirique suivant :

$$7.29 + 0.6933333333 * \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) + (-0.32) * \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) + \left( \frac{(sable - 2.25)}{0.25} \right) * \left( \left( \frac{(KOH - 1.5)}{1.5} \right) * (-0.23) \right)$$



**Figure V. 24 :** L'évolution des résistances résiduelles a la flexion en fonction de pourcentage de KOH et le type de sable.

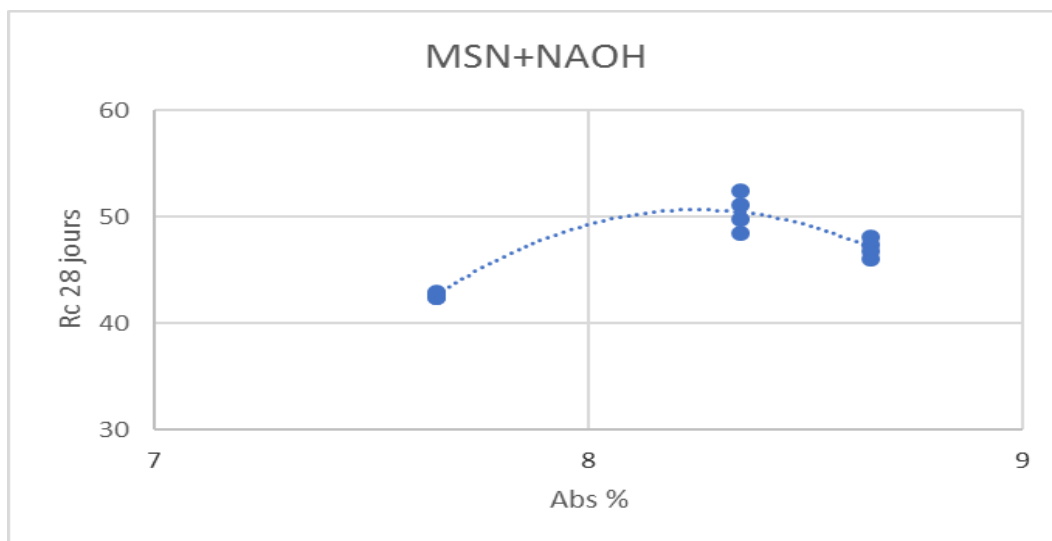
## V.3 Étude de corrélation (Méthode EXCEL)

### V.3.1 Effet de NaOH

#### V.3.1.1 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs%) pour MSN

$$R_c = -22,31 \text{ Abs}^2 + 368,1 \text{ Abs} - 1467,7$$

$$R^2 = 0,919$$



**Figure V.25:** Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSN

## V.3.1.2 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs%) pour MSN

$$R_f = 2,9803e^{0,1231 \text{ Abs}}$$
$$R^2 = 0,5827$$

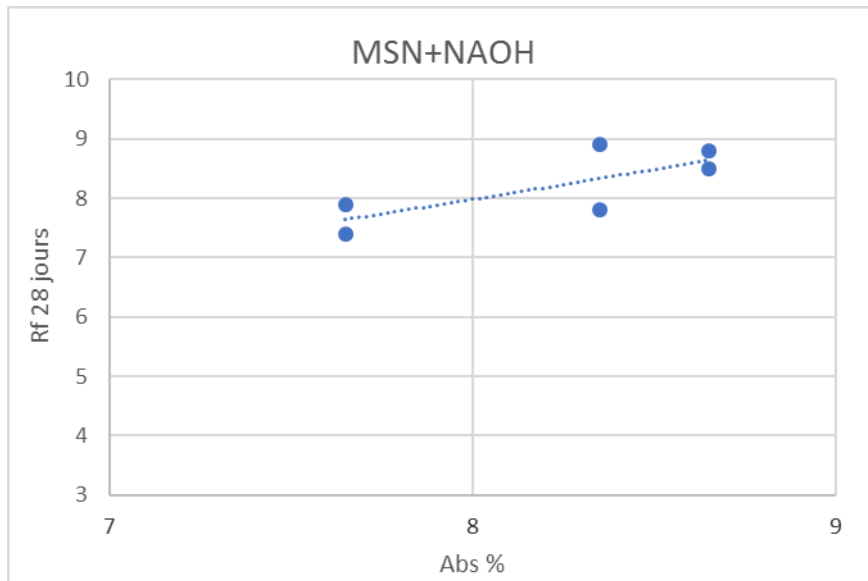


Figure V.26: Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSN

## V.3.1.3 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs%) pour MSD

$$R_c = 19,143 \text{ Abs}^2 - 254,07 \text{ Abs} + 882,02$$
$$R^2 = 0,5606$$

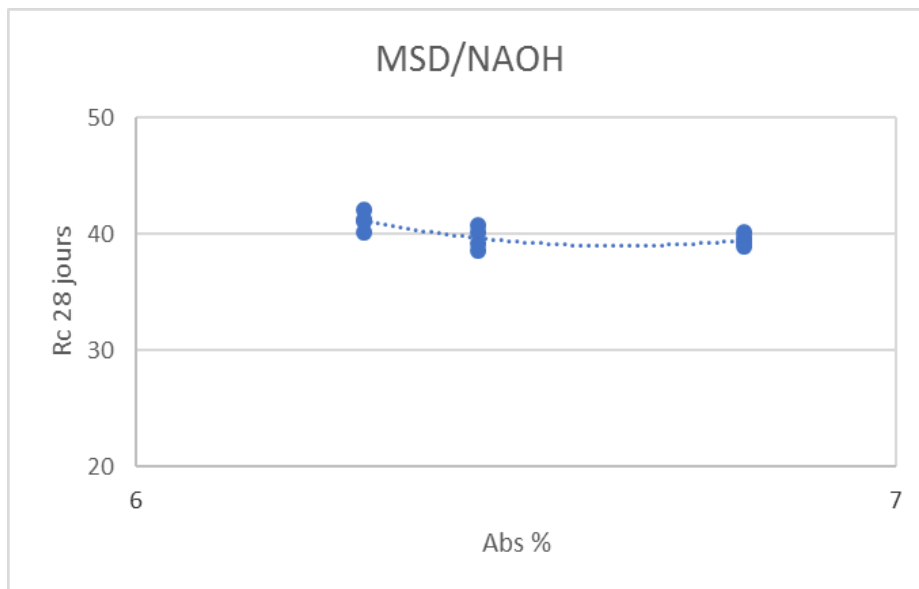
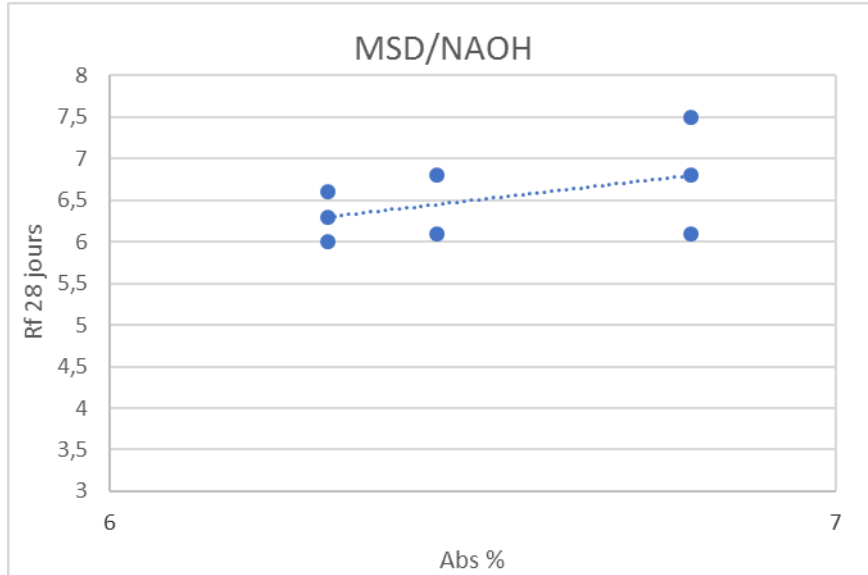


Figure V.27: Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSD

## V.3.1.4 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs%) pour MSD

$$R_f = Abs - 6E-15$$

$$R^2 = 0,2173$$

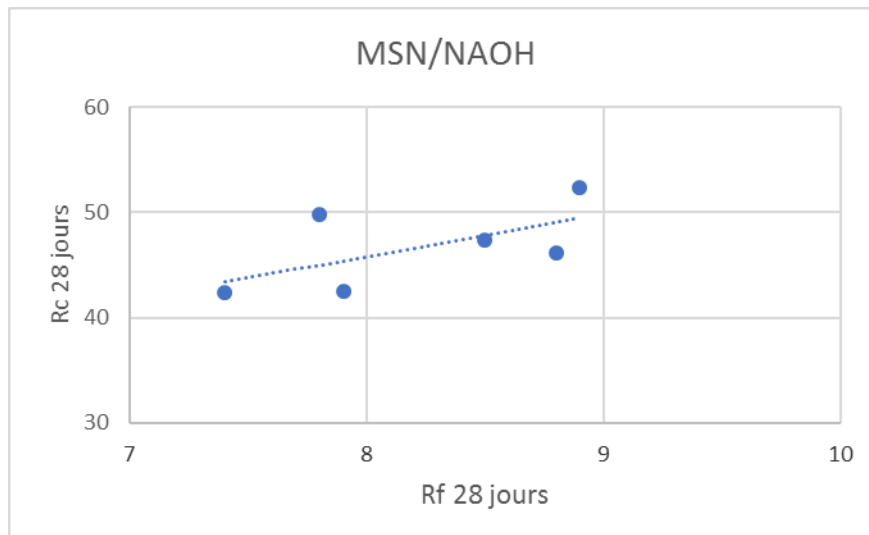


**Figure V.28:** Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSD

## V.3.1.5 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN

$$R_c = 22,993e^{0,086R_f}$$

$$R^2 = 0,3762$$



**Figure V.29:** Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN

## V.3.1.6 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD

$$R_c = 0,7614 R_f^2 - 10,66 R_f + 77,158$$
$$R^2 = 0,144$$

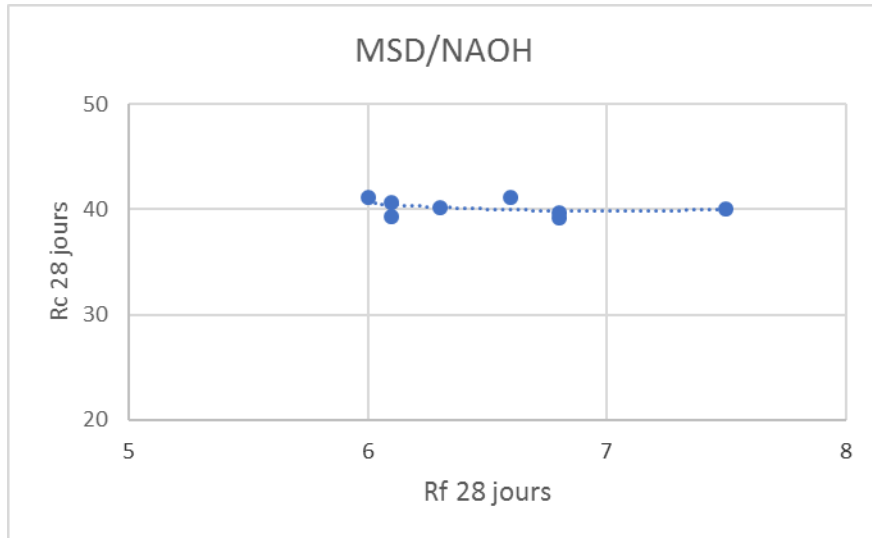


Figure V.30: Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD

## V.3.2 Effet de KOH

### V.3.2.1 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs) pour MSN

$$R_c = 187,19 Abs^2 - 3019,1 Abs + 12209$$
$$R^2 = 0,9183$$

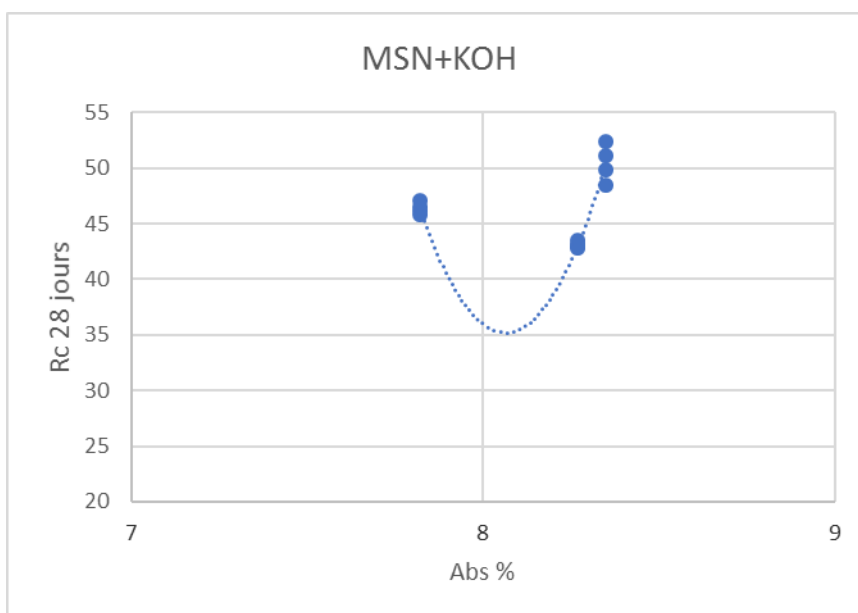
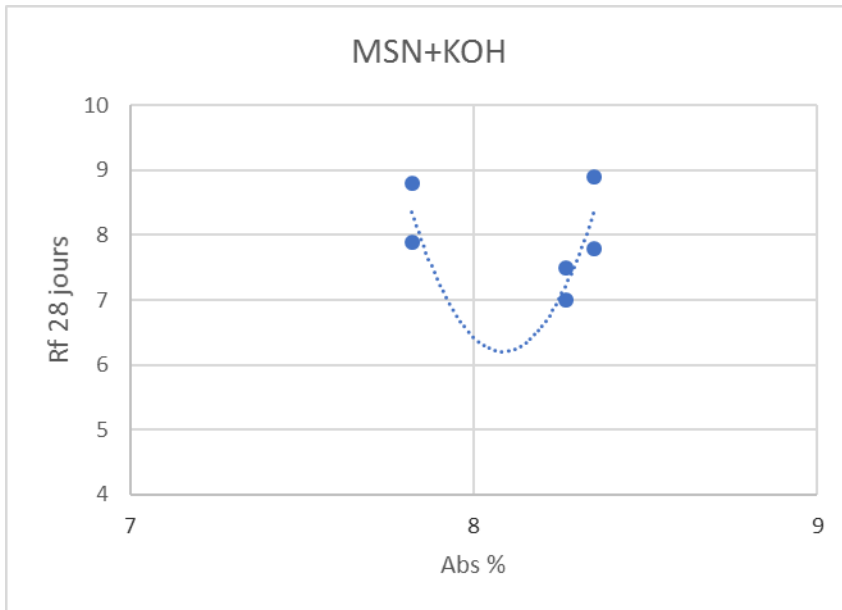


Figure V.31: Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSN

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

## V.3.2.2 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSN

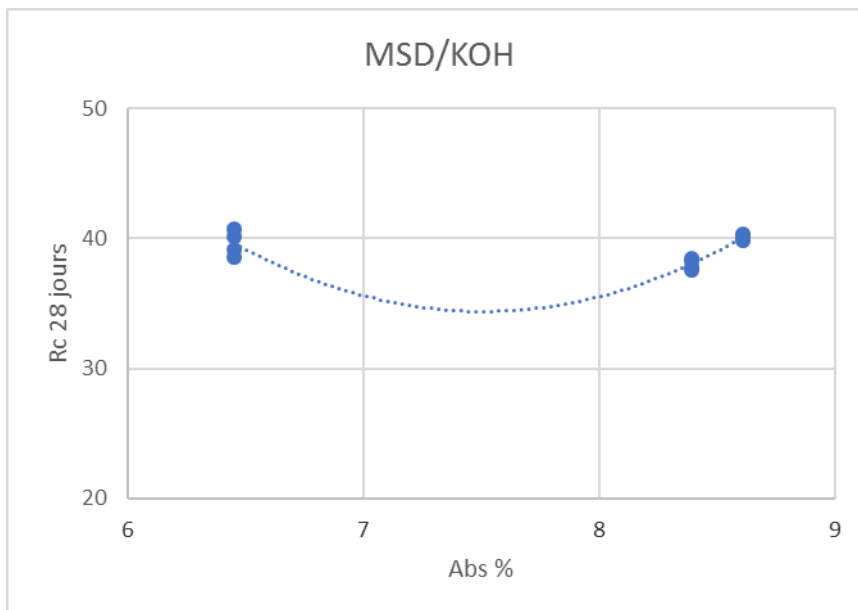
$$R_f = 30,556 \text{ Abs}^2 - 494,08 \text{ Abs} + 2003,5$$
$$R^2 = 0,587$$



**Figure V.32:** Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSN

## V.3.2.3 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSD

$$R_c = 4,6958 \text{ Abs}^2 - 70,51 \text{ Abs} + 299,09$$
$$R^2 = 0,7414$$



**Figure V.33:** Corrélation entre (Rc) en fonction de (Abs %) pour MSD

# CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

## V.3.2.4 Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSD

$$R_f = 1,7273Abs^2 - 25,727 Abs + 100,53$$

$$R^2 = 0,4425$$

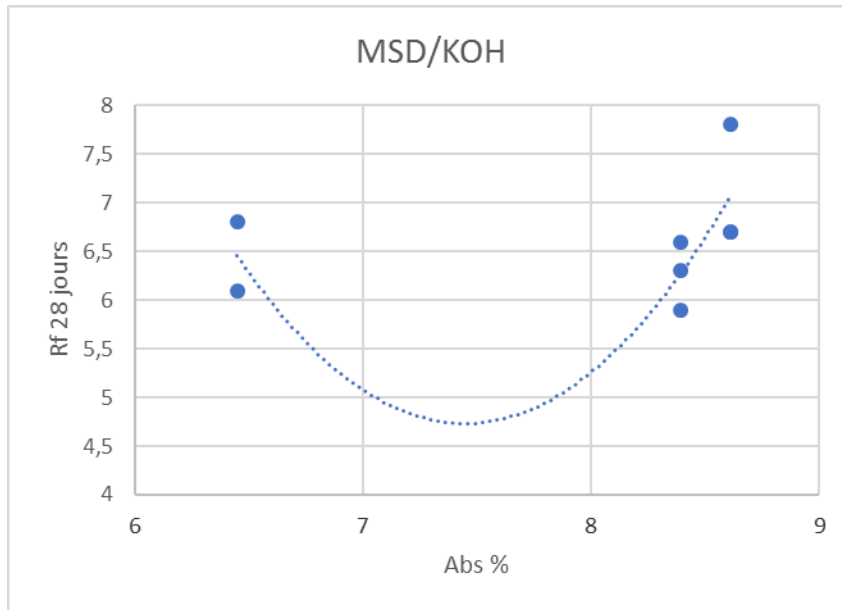


Figure V.34: Corrélation entre (Rf) en fonction de (Abs %) pour MSD

## V.3.2.5 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSN

$$R_c = -1,4664R_f^2 + 26,982R_f - 74,193$$

$$R^2 = 0,5372$$

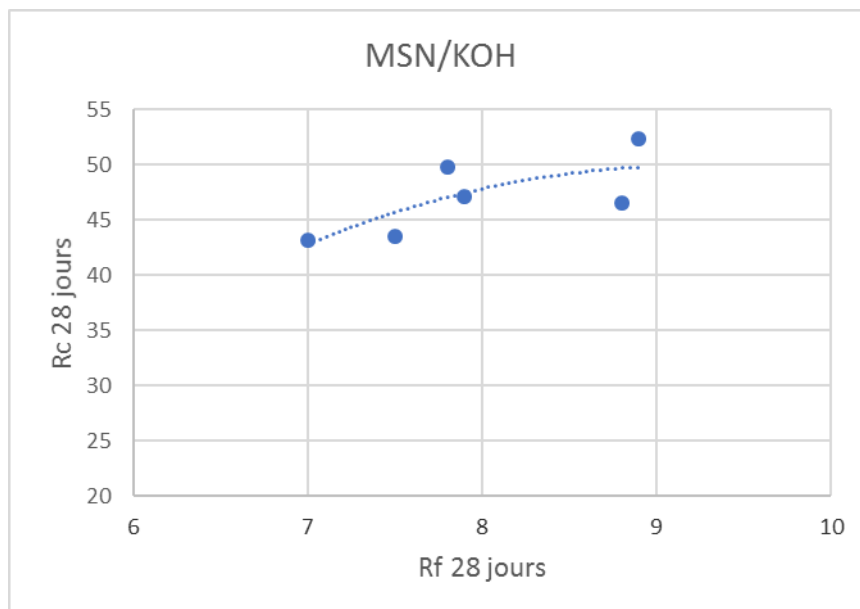
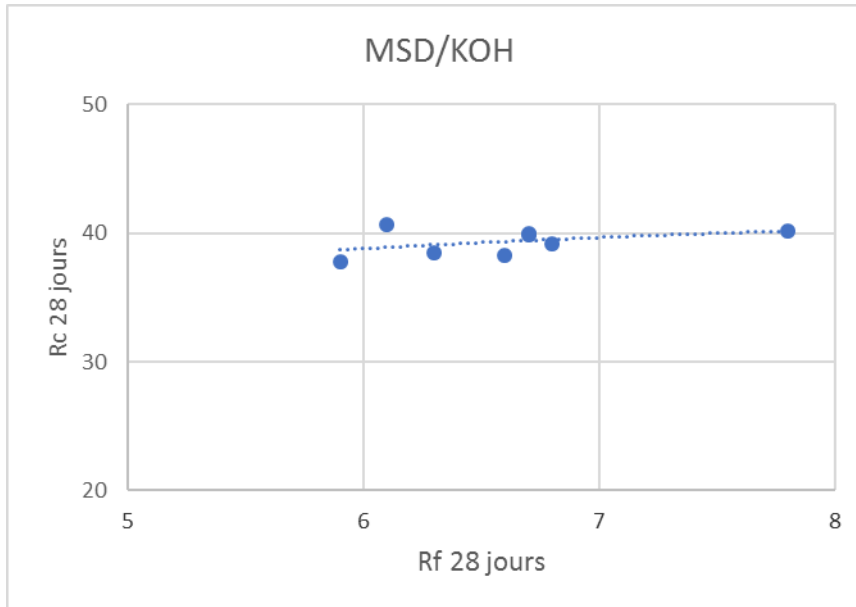


Figure V.35: Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD

## V.3.2.6 Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD

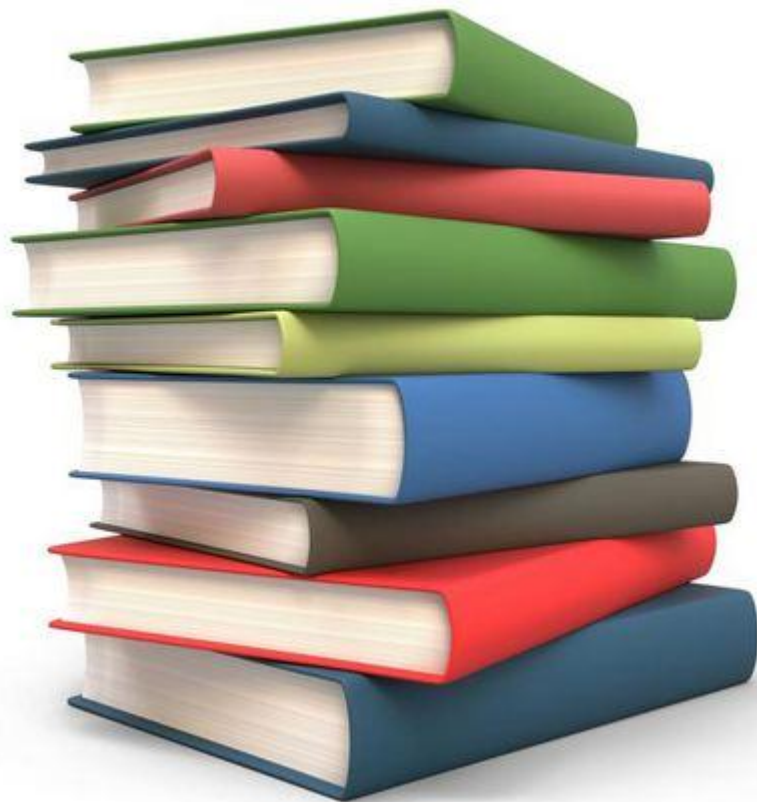
$$R_c = -0,1273R_f^2 + 2,5096 R_f + 28,332$$

$$R^2 = 0,1829$$



**Figure V.36:** Corrélation entre (Rc) en fonction de (Rf) pour MSD

# Conclusion Générale



## Conclusion générale

L'Objectif de cette étude était de déterminer l'effet d'activation de ciment par plusieurs méthodes sur le comportement mécanique de mortier avec un seule type d'activation (chimique)

L'activation chimique a été effectuée par l'ajout de deux types d'alcalin (KOH et NaOH) à des dosages de 0, 1.5 et 3%.

L'analyse des résultats obtenus de l'étude expérimentale réalisée a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'activation chimique influe directement sur la résistance mécanique et le délai de prise du liant, cela est due à la présence d'un pH supérieur ou égale à 12 qui favorise la dissolution des constituants du ciment (la présence d'un activateur basique influe directement sur la solubilité des composants du liant), en permettant la formation des hydrates stables et par conséquent accélère le développement de la résistance du mortier en question(activé).

- L'activation du ciment par la soude utilisée comme accélérateur de prise (NaOH) améliore le délai de prise et donne des résistances mécaniques supérieures par rapport au mortier activé chimiquement par la potasse (KOH) pour les deux types de sable.

- A l'état frais les activant de soude et potasse conduisent à une légère augmentation de de début de Prise DP et fin de prise (moins de 10 Minutes) pour les dosages jusqu'à 3 % et consistance normale fixe de mortier (ouvrabilité).

- Les meilleures réponses mécaniques ont été notés pour les deux activant à 28 jours à une valeur maximale environ 50 MPa pour la résistance à la compression et au-delà de 8 MPa pour la résistance à la flexion. Cependant à jeune âge le NaOH s'avéré plus performant à l'âge de 2 jours par apport au KOH.

- La modélisation par cette méthode de plan d'expérience est plus bénéfique dans le cas de la réponse mécanique (compression  $R_c$  et flexion  $R_f$ ) en question pour les valeurs observées (expérimentalement) et celles prévues (prédiction) avec des coefficients de corrélations importants.

- L'utilisation de l'analyse factorielle par de la méthode de plan d'expérience (JMP) à pu mettre en évidence l'influence de chaque facteur seul ou combiné et par conséquent une facilitation de l'interprétation des résultats quant à l'interaction ces facteurs.

- Le type de sable semble un facteur déterminant avec un effet significatif comme illustré par le modèle (JMP) interaction des facteurs. Quant à la réponse mécanique du mortier. Selon la méthode EXCEL, le modèle linéaire donne de faible corrélation et ne conduit pas à des modèles mathématiques fiable pour le cas de notre étude ; ceci peut être expliquer par le nombre limité de valeurs de la réponse mécanique et donc utiliser un nombre conséquent d'essais peut mieux quantifier l'effet des facteurs

étudiés sur la réponse mécanique cherchée. Cependant, une concordance entre les deux méthodes (JMP) et EXCEL est observée pour les valeurs envisagées et celles issues des expériences pour la réponse mécanique et avec des coefficients  $R^2$  ajustés supérieurs à 0.90 pour les activant (NaOH et KOH) employés.

En général et à l'issue de cette recherche on peut conclure que l'activation chimique demeure avantageuse pour améliorer la résistance mécanique des mortiers à jeune âge et à moyen terme. En plus les méthodes de plan d'expérience restent un outil nécessaire pour l'analyse factorielle et la détermination de l'effet de chaque paramètre seul ou avec interaction avec d'autres. Ceci, permet de tirer des modèles mathématiques dans le cas des mortiers avec activation chimique avec des pourcentages optimisés (1,5 %) dans les deux cas d'activant (KOH et NaOH) utilisé dans la présente étude.

Pour compléter cette étude, il s'avère nécessaire de donner quelques perspectives :

- Effet de l'activation thermique sur le comportement mécanique du mortier et de béton.
- Effet de l'activation chimique et mécanique sur le comportement du mortier et de béton et compléter l'étude de durabilité des bétons afin de s'assurer que le gain de performances à court terme et long terme.
- Voir l'effet de l'activation (chimique et mécanique) du ciment sur le comportement mécanique du mortier à base de ciment CRS et il est souhaitable de parfaire l'étude par une Analyse thermogravimétrique par ATD/ATG et DRX pour une meilleure compréhension des constituants de la matrice cimentaire et du développement de durcissement qui va influencer la réponse mécanique à jeune âge et à long terme

# Références bibliographiques

## Normes

[EN- 197-1, 2011] EN- 197-1, 2001Ciment—Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. AFNOR, Paris.

[NF-EN 196-1] Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances mécaniques

[NF EN 197] (2001 à 2004) « Ciment », AFNOR

[EN 933-1] (Mai 2012), Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR.

[EN 933-8] (Juillet 2015), Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable. AFNOR.

## A

[Aldea et al., 2005] Aldea C.M., Young F., Wang K., Shah S.P., (2005), Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement". Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 465-472.

[Asaga, 1992] Asaga K., Ishizaki M., Takahashi S., Konishi K., Tsurumi T., Daimon M., (1992), Effect of curing temperature on the hydration of portland cement compounds, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, pp. 181-187.

## B

[Barnett et al., 2006] Barnett S.J., Soutsos M.N., Millard S.G., Bungey J.H., (2006), Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 434-440.

[Baron, 1997] Baron. J, Olivier. JP et Weiss. JC (1997), Les ciments courants », « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles, 806p.

[Barret, 1979] Barret P., (1979), Thermodynamique chimique: sur l'existence d'un stade d'hydroxylation superficielle dans le processus de dissolution du silicate tricalcique  $3\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  et son influence sur la solubilité de ce constituant du ciment ». *C. R. Acad. Sc.*, vol. 288 (Série C), p. 461-464.

[Barret, 1986] Barret P., Bertrandie D. (1986), Fundamental hydration kinetic features of the major cement constituents:  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  and  $\text{bCa}_2\text{SiO}_4$ ". *Journal de Chimie physique*, vol. 83, n° 11/12, p. 765-775.

**[Belagraa et al, 2016]** Belagraa L, Bouzid abderrazak, (2016), performance study of low environmental impact mortars based on mineral addition and cement resistant to sulfate (CRS), mining science, vol. 23, 2016, 65-76, vol:23, Issue: -1, pages:65-76, faculty of geoengineering, mining and geology Wroclaw university of science and technology ul, wybrzeze wyspianskiego 27, 50-370 wroclaw, poland

**[Benia, 2008]** Benia A ;(2008), Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux, mémoire Magister, université de M'Sila.

**[Briki, 2019]** Briki L ;(2019), Contribution à l'étude expérimentale et théorique des mortiers confectionnés avec un sable local et préparé à base d'additions minérales, mémoire fin d'étude, université de M'Sila.

## E

**[Eren, 2002]** Eren O., (2002), Strength development of concretes with ordinary Portland cement, slag or fly ash cured at different temperatures". Materials and Structures, Vol. 35, pp. 536-540.

## F

**[François, 2005]** Témoignage de l'association Expérimentique [1996-2005], sous la coordination de François LOUVET et Luc DELPLANQUE, Design of experiments: une approche pragmatique et illustrée: the French touch », Orléans: Expérimentique, DL 2005 ISBN: 2-9525126-0-4

**[Frédéric, 1995]** G. Frédéric (1995), Modélisation et optimisation par plan d'expérience d'un moteur à commutation électronique, Thèse de doctorat de l'université des science et technologie de Lille.

## G

**[Gallias, 2000]** Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P., (2000), The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, Cement and Concrete Research, vol. 30, n° 10, p.1543-1549.

**[Goto et Roy, 1981]** Goto S., Roy D.M., (1981), The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste". Cement and Concrete Research, Vol 11, pp. 575- 579.

**[Goupy, 1996]** Goupy J., (1996), La méthode des plans d'expériences – Optimisation du choix des essais et de l'interprétation des résultats", Ed. Dunod.

## K

**[Kerbouche, 2009]** Kerbouche, A., Mouli, M., Laoufi, L., Senhadji, Y. & Benosman, A. (2009), Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers, 1<sup>st</sup> International Conference

on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12-14,

**[Kjellsen, 1990]** Kjellsen K.O., Detwiler R.J., Gjorv O.E., (1990), Pore structure of plain cement pastes 933.

**[Kjellsen, 1991]** Kjellsen K.O., Detwiler R.J., Gjorv O.E., (1991), Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures". Cement and Concrete Research, Vol 21, pp.179-189.

**[Kjellsen, 1992]** Kjellsen K.O., Detwiler R.J., (1992), Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp.112-120.

**[Kosmatkas, 1991]** Kosmatkas., H., Panareswe. C., Alleng., E., CummmgS, (1991), Dosage et contrôle des mélanges de béton D, Association Canadienne du Ciment Portland. 2 13 p.

## L

**[Ladjel, 2020]** Ladjel D, Belagraa L, chemical activation effect on the mechanical response of mortars based on dune sand, Mining science, Vol:27, pages:6171, [www.miningscience.pwr.edu.pl](http://www.miningscience.pwr.edu.pl)

**[Ladjel, 2019]** Ladjel D, Belagraa L, Moncef Zairi, Kessal Oussama, Nacéri A, (2019), Characterization of Cement-Based Mortars Chemically Active (Gypsum and Plaster) By Design of Experiments Methods., Transylvanian Review, Vol:38, Issue:201938, pages:14, [transylvanianreview@gmail.com](mailto:transylvanianreview@gmail.com)

**[Laadjal, 2019]** Laadjal Djelloul, (2019), Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des matériaux à base cimentaire, Thèse de DOCTORAT, Université de Sfax, Tunisie.

**[Laadjal, 2001]** Laadjal D., Bouallleg S., (2001), Effet de l'activation du ciment sur la résistance mécanique du mortier, Mémoire de fin d'étude, Université de M'sila, Algérie.

## M

**[Malhotra, 1987]** Malhotra, M., (1987), Propriétés du béton frais et du béton durci renfermant du laitier de haut fourneau granulé et broyé, Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton, CANMET, V.M. Malhotra, ed., p. 328-371

**[Maanene, 2018]** Maanene N, Belagraa L, (2018), Effet de l'activation chimique et mécanique sur les ciments fabriqués en Algérie, aux moyens de plan d'expérience, Mémoire de Master, Matériaux, Département de génie civil, Université, Med Boudiaf de M'sila, Algérie

**[Mercier, 1999]** Mercier, J. P., Zambelli, G. & Kurz, W. (1999). Introduction à la science des matériaux, PPUR presses polytechniques.

**[Moudilou, 2000]** Moudilou E, (2000), Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présent en traces dans les matrices cimentaires. Thèse Université d'Orleans, 2000.

## N

**[Nasri, 2007]** Nasri A., (2007), Effet de l'activation mécanique des ciments aux ajouts minéraux sur les caractéristiques mécaniques du mortier, Algérie Equipment -N43.

## P

**[Perlot, 2005]** Perlot C., (2005), Influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert: application au stockage profond de déchets radioactifs, Thèse de doctorat Université Paul Sabatier de Toulouse U.F.R. P.C.A. et Faculté de Génie de l'université de Sherbrooke.

**[Pill1, 999]** Maurice Pillet (1999), Les plans d'expériences par la méthode Taguchi »: Les Ed. d'Organisation, c1997, ISBN: 2-7081-2031-X,

## Q

**[Qian et al., 2001]** Qian J., Shi C., Wang Z., (2001). "Activation of blended cements containing fly ash". Cement and Concrete Research, Vol. 31(8), pp. 1121-1127.

## R

**[Runzhang, 1988]** Runzhang, Y. (1988). Study on structure and latent hydraulic activity of slag and its activation mechanism. Silicates industriels, (4): 55-59.

## S

**[Sajedi et Razak., 2011]** Sajedi F., Razak H. A., (2011). "Comparison of different methods for activation of ordinary portland cement-slag mortars". Construction and Building Materials, Vol. 25(1), pp.30-38.

**[Saidat, 2013]** Saidat. F (2013), Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire. THÈSE de Doctorat de l'université de Toulouse, Discipline ou spécialité: Génie Civil, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France,

**[Shi et Day., 1996]** Shi C., Day R. L., (1996). "Selectivity of alkaline activators for the activation of slags». Cement, Concrete and Aggregates, Vol.18(1), pp. 8-14

## T

[**TINS, 2010**] Tinsson W., (2010), Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques, MATHEMATIQUES & APPLICATIONS, Springer Heidelberg Dordrecht London New York ;2010

## V

[**Verbeck, 1968**] Verbeck. G.J, Helmuth. R.H, (1968) «Structures and physical properties of cement paste», Proc. 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 3, 3-1, pp.1-44.

[**Vigier, 1988**] M. Vigier (1988); pratique des plans d'expériences: méthodologie Taguchi. Les éditions d'organisation,

# ANNEXE



# Mokaouem Plus

مقاوم بلوس

**LAFARGE**  
Construire  
des villes meilleures™



## Ciment Portland

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3

**Mokaouem** est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

**Mokaouem**  
NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

**Mokaouem** NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

### AVANTAGES PRODUIT











- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.

## APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire"

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### • Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

### • Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

### • Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

### • Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

### • Propriétés physiques

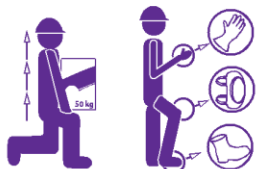
	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



Conditionnement:



 A member of  
**LafargeHolcim**

### LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,  
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.  
tél: + 213 (0) 21 98 54 54  
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94  
www.lafargealgerie.com  
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com  
Tél: 021 98 55 55

 **LAFARGE**  
لافارج



# Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)

Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 – Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72

Internet : [www.s-n-l.fr](http://www.s-n-l.fr) - e.mail : [contact@s-n-l.fr](mailto:contact@s-n-l.fr) • [s.n.l@wanadoo.fr](mailto:s.n.l@wanadoo.fr)

SABLE NORMALISE CEN  
CERTIFIE CONFORME –  
EN 196-1 par l'AFNOR et conforme ISO 679

SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE  
CONFORME EN 196-1  
SABLE NORMALISE ISO  
CONFORME ISO 679

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux  
de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)  
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy  
75014 PARIS

**Méthodes d'essais des ciments**  
Sable pour mesure des résistances mécaniques

## 1- CARACTERISTIQUES

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1 350 ± 5 g.

Les livraisons se font à l'unité carton de 16 sachets pesant 21.6 kg et sur palette de 2 à 54 cartons, protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

## 2- CONTROLES

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5).

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11).

## 3- CONFORMITE

La conformité à la norme est contrôlée par le L.E.M.V.P. (Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS

Le certificat de conformité à la norme Européenne est délivré par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.

MAJ : 1 - 05/11



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANIQUES DES CIMENTS



**CERTIFICAT DE QUALITE**

Date de Prélèvement : 01 au 07/03/2021  
 Type du Ciment : Ciment Résistant aux sulfates NA 442 V 2013 - CEM I 42,5N SR3

Moukaouem

**CARACTERISTIQUES PHYSICO- CHIMIQUES DU CIMENT**

Caractéristiques	Normes	Exigences NA 442/NA 443		Unité
SiO <sub>2</sub>	NA 5042	20,41	/	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,80	/	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,82	/	%
CaO		63,41	/	%
K <sub>2</sub> O		0,56	/	%
Na <sub>2</sub> O		0,06	/	%
Na <sub>2</sub> O-Equ		0,43	/	%
Perte au feu 'PAF'	NA 5042	0,62	≤ 5,0	%
Residus insolubles: ' Ins. Res'	NA 5042	0,62	/	%
Teneur en oxyde de Magnésium (MgO)		1,88	/	%
Teneur en anhydrite sulfurique (SO <sub>3</sub> )	NA 5042	2,47	≤ 4,0	%
Chlorure	NA5038	0,02	≤ 0,10	%
Chaleur hydratation (à 41 heures)	NA5061	207	≤ 270	J/g
Début du Temps de Prise (min)	NA 230	243	≥ 60	min
Fin du Temps de Prise (min)		305	/	min
Expansion "Le Chatelier" (mm)	NA 230	1	≤ 10	mm

Caractéristiques	Normes	Résultats	Exigences norme	Unité
2 days	NA 234	18,40	≥ 10	MPa
28 days		51,40	≥42,5 & ≤62,5	

Responsable Support Technique

