



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : (Master)

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME :

**L'étude de la réponse mécanique d'un mortier à base d'un ciment
avec ajouts minéraux par la méthode des plan d'expériences**

Préparé par : MANSOURI MESSAOUDA
AROUS IMENE

Soutenu le : 23 -06-2014

Devant le jury :

Encadreur : BOUGLADA. MS

Co- Encadreur : NOUI. A

Président : BOUKELOUA. S

Examineur : ATTIA

Examineur : LOGZIT.N

Année Universitaire 2013-2014

REMERCIEMENT

Tous d'abord nous tenons à remercier 'Allah 'le tout puissant qui nous à donné la force et la patience pour terminer ce présent travail ainsi que nos parents qui nous toujours encouragés et soutenu durant tout la durée de nos études.

Nous tenons à remercier notre encadreur de mémoire Mr Bouglada, pour avoir accepté de nous encadrer, pour ses conseils et ses orientations pour mieux élaborer ce travail de recherche et pour qu'il nous guide sur le bon chemin durant l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons exprimer notre sincère gratitude à Mr Noui Ammar qui a accepté de participer comme Co-encadreur dans ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, afin de mener au mieux ce travail de recherche.

Nous voudrions remercier l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail :

Mr Boukeloua, Mr Loguezit et Mme Houssou .

Nous adressons nos remerciements à tous les responsables du laboratoire de génie civil : Farid, Zobir, Fatiha Oussama et Hayat qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Nous remercions aussi l'administration de génie civil

Nous tenons également à remercier Tous les enseignements de Génie Civil

Mr Seddiki Ahmad, Mr Mekki, Mr Mohamadi, Mr ben aichi ,Mr Medanh ,Mr Atia,Mr belagueraa , Mr Louguezite ,Mr Loumachi ,Mr Messaouden, Mr Bogueraa,

Mansouri Messaouda

Et

Merci... Inmen arous

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم و الصلاة و السلام على سيدنا محمد صالح الله على و سلم

اشكر الله العلي القدير على فضله و رحمته بي التي وسعت كل مراحل عمري ووقفتني في طلب العلم.

أهدي عملي المتواضع هذا إلى أحب الناس إلى قلبي:
إلى من تحملت حرقة قلبي وغصات حلقي**أمي الغالية**الطيبة، المتفهمة،
الحنونة رعاها الله لي، قدوتي في الدين و الدنيا، المشتاقة دائماً إلى حضنها وطماتها المليئة
بالحب و الإحساس بالأمان.

إلى طيب القلب ورهيف الإحساس.....**أبي الغالي** ما نسيت يوماً نصائحك التي
أوصلتني بر الأمان لن أنسى تعبك و مراعاتك لي ما حبيت في هذه الدنيا .
إلى زوجي الحبيب رفيق عمري الوحيد و إلى الأبد**وليد**شريان القلب و الروح
إلى ورود حياتي إخوتي**توفيق** بلسم الروح الحنون**خير الدين** والواله المدلل
عز الدين

إلى أخواتي وردة الصبا**صونيا** زنبقة الروح**شافية** رمز البراءة**أحلام**
إلى بيتي الصغير الثاني**أمي و أبي، رؤوف، أسامة، منصف، أصالة**
إلى الكتكتين الصغيرين**بلال و محمد**
إلى زوجات إخوتي**أحلام**سرور** مريم**
إلى البنات المشاكسات**سماح** فتيحة** سلمى** سارة** هدى** هاجر**إيمان**
أروع لحظات العمر معكن

إلى كل زملائي الذين كانوا لي إخوة حقيقيين كل باسمه

إلى دفعة الماستر 2 / 2014

إلى من فرقنا الأقدار عن لقاءهم و حرمتنا المكاتيب من رؤياهم
إلى كل قلب طيب يحب الله و يقدر العلم

منصور

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents djemi et zahia, pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

que dieu le tout puissant les protègent et les gardent.

Et je dédie à mon marie Ahmed et remercie du fond du cœur de ce patience.

Mes frères : Saleh et Abdou

Mes sœurs : Assia et son marie Khalil et ma petites sœur Souhila.

Ma cousine Nabila et Nadia et leurs sœurs et frères

Ma ante Fatiha et leurs fillls Zineb et Saïda

Et à tout ma famille

A ma ante Eldjia et leur fillls Amel, warda, salima, fatima et leur fils Hassane et Affane

A messouda

A tous mes amies : ahlem, imene, zouleykha, Khaoula, Mouna et lamia

Et tous mes collègues de clacsse génie civil mastre II, fillls et garçons

A tous ceux qui m'ont aidé de pré ou de loin.

Arous Imene .

L'étude de la réponse mécanique d'un mortier à base d'un ciment avec ajouts minéraux par la méthode des plans d'expériences

RESUME

Dans ce travail expérimental on a étudié le comportement mécanique ainsi que la durabilité d'un mortier à base d'un ciment quaternaire composé du clinker broyé gypse et trois ajouts minéraux, la pouzzolane, le calcaire et le laitier, sachant que La résistance mécanique d'un mortier est étroitement liée à sa composition.

Dans le but d'optimiser le nombre d'essais, et par suite le nombre de mélanges à préparer, qui répondent correctement à nos attentes, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ».

Pour réaliser ce travail et dans le but de montrer et d'analyser l'influence de chaque constituant sur La résistance mécanique et la durabilité d'un mortier, nous sommes amenés à préparer un ensemble de mélanges (de ciments) sur la base des plans d'expériences dont on fait varier le pourcentage des trois ajouts (Laitier-calcaire-pouzzolane) de 0% à 35% d'une composition à une autre avec la contrainte de conserver un pourcentage de 35% pour l'ensemble des ajouts dans chaque mélange et ceci pour former des ciments binaire, ternaire et quaternaire avec un pourcentage de 35% d'ajouts et le Clinker broyé gypse demeure inchangé avec un pourcentage 65%. Et en fin on projette d'évaluer l'influence de chaque ajouts ainsi l'effet d'associer deux ou trois ajouts à la fois et la signification de ces interactions sur le comportement mécanique et la durabilité du mortier testé.

Mots-clés : ciment avec ajouts minéraux, Ajouts minéraux, ciment quaternaire.

دراسة الاستجابة الميكانيكية وديمومة الاسمنت الرباعي باستعمال طريقة تصميم التجارب

ملخص

في هذا العمل التجريبي قمنا بدراسة الاستجابة الميكانيكية وديمومة المونة على أساس الاسمنت الرباعي المكون من الكلنكر و ثلاثة من الإضافات المعدنية، البوزولان، الخبث و الحجر الجيري مع العلم أن مقاومة المونة تتعلق بمكوناتها.

من أجل تقليص عدد التجارب، وبالتالي عدد الخلطات المحضرة لتلبية توقعاتنا بشكل صحيح، استخدمنا منهاج إحصائي عملي يسمى "تصميم التجارب".

و لإظهار و تحليل تأثير كل مكون على القوة الميكانيكية و ديمومة المونة، قمنا بإعداد مجموعة من مخاليط الاسمنت حسب طريقة "تصميم التجارب" مع تغيير في نسب المكونات الثلاثة (الخبث، الحجر الجيري، البوزولان) إلى 35% من 0% في جميع خلطات الاسمنت الثنائي، الثلاثي و الرباعي والحفاظ على نسبة الكلنكر بـ 65 %.

وفي النهاية قمنا بواسطة "طريقة تصميم التجارب" بتقييم تأثير كل الإضافات و تأثير الجمع بين اثنين أو ثلاثة، وأهمية هذه التفاعلات على الاستجابة الميكانيكية و ديمومة المونة في حمض الكبريت، وفي الأخير الخروج بعدة "نماذج حسابية" تلخص هذه التأثيرات .

مفاتيح :

الاسمنت الرباعي، تصميم التجارب، الديمومة، المونة، الإضافات المعدنية .

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	1
II. CONTEXTE	2
III. OBJECTIF	2
IV. METHODOLOGIE DE TRAVAIL	2

PREMIER PARTIE SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LE CIMENT

I.1. HISTORIQUE.....	4
I.2. DEFINITION DU CIMENT.....	4
I.3. ETAPE DE FABRICATION DU CIMENT.....	5
I.3.1. Fabrication du clinker	5
I.3.2. Extraction et concassage	5
I.3.3. Préparation de la matière première	6
I.3.4. Voie sèche.....	6
I.3.5. Autres techniques de préparation de la matière	6
I.3.6. Cuisson du cru.....	6
I.3.7. Broyage du clinker	7
I.4. LES CONSTITUANTS DU CIMENT	7
I.4.1. Le clinker	7
I.4.2. Le gypse	9
I.4.3. Les ajouts minéraux	9
I.5. CLASSIFICATION DES CEMENTS	10
I.5.1. Classification des ciments en fonction de leur composition.....	10
I.5.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normal.....	11

CHAPITRE II : HYDRATATION DU CIMENT

II.1. INTRODUCTION	12
II.2. HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT	12
II.2.1. Hydratation du silicate tricalcique (C3S) (alite).....	13
II.2.2. Hydratation du silicate bicalcique C2S (bélite).....	14
II.2.3. Hydratation du C3A.....	14
II.2.4. L'hydratation du C4AF	15
II.3. HYDRATATION ET REACTION POZZOLANIQUE	15
II.4. HYDRATATION DU LAITIER.....	16
II.5. CONCLUSION	16

CHAPITRE III : LES AJOUTS MINERAUX

III.1. GENERALITES.....	17
III.2. CLASSIFICATION DES AJOUTS	17
III.2.1. Principaux ajouts minéraux inertes	18
III.2.1.1. Fillers calcaire	18
III.2.2. Principaux ajouts minéraux actifs	18
III.2.2.1. La pouzzolane	18

SOMMAIRE

III.2.2.1.A. Définition	18
III.2.2.1.B. Types de pouzzolane	19
III.2.2.2. Le laitier de haut fourneau	20
III.2.2.2.A. Composition chimique	20
III.2.2.2.B. Composition minéralogique	20
III.3. L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL	21
III.3.1. Economique.....	21
III.3.2. Technique	22
III.3.3. écologiques et environnementaux	22
III.5. CONCLUSION	22

CHAPITRE IV :

EFFETS DES AJOUTS MINERAUX SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES ET LA DURABILITE DES MATERIAUX.

IV.1. INTRODUCTION	24
VI.2. LA PERMEABILITE	24
VI.3. L'ALCALI REACTION	24
VI.4. LA LIXIVIATION EN EAU DOUCE	25
VI.5. ACTION DES SELS.....	26
VI.6. ACTION DES BASES.....	27
VI.7. ACTION DES SULFATES	27
VI.7.1. Mécanisme d'attaque	27
VI.8. ACTION DES ACIDES	28
VI.8.1. Introduction.....	28
VI.8.2. Source des acides	28
VI.8.3. Mécanisme d'attaque	29
VI.9. INFLUENCE DES AJOUTS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES	30
VI.10. INFLUENCE DES AJOUTS SUR L'ABSORPTION (SPORTIVITE).....	31
VI.11. INFLUENCE DES AJOUTS VIS-A-VIS DES ATTAQUES ACIDES	33
VI.12. CONCLUSION.....	35

CHAPITRE IV : PLAN D'EXPERIENCE

VI.1. INTRODUCTION.....	36
VI.2. DEFINITION.....	36
VI.3. INTERETS DES PLANS D'EXPERIENCES.....	37
VI.4. TERMINOLOGIE.....	37
VI.5. METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES.....	38
VI.5.1. la recherche des facteurs influents.....	38
VI.5.2. la modélisation.....	39
VI.5.3. l'optimisation.....	39
VI.6. DIFFERENTS TYPES DE PLANS D'EXPERIENCES.....	39
VI.6.1. plans factoriels complets a deux niveaux.....	39
VI.6.2. plans fractionnaires a deux niveaux.....	40

SOMMAIRE

VI.6.3. plans de mélange.....	40
VI.6.3.1. modèles représentatifs d'un mélange.....	40
VI.6.3.2. différents types de mélanges.....	41
VI.7. OUTILS DE CALCUL.....	41
VI.8. PRESENTATION DE LOGICIEL « DESIGN-EXPERT ».....	42
VI.9. CONCLUSION.....	44

DEUSIEME PARTIE **ETUDE EXPERIMENTALE**

CHAPITRE I : PREPARATION DES MATERIAUX UTILISES

I. PREPARATION DES MATERIAUX UTILISES	46
I.1. La préparation du ciment	46
I.1.1. L'extraction des matières première.....	46
I.1.2. Le séchage et le broyage	46
I.1.3. Le clinker	46
I.1.4. Le gypse	47
I.1.5. Les ajouts	47
I.1.6. Plan d'expérience – Préparation des mélanges	48
I.1.6.1. Introduction.....	48
I.1.6.2. Facteurs.....	48
I.1.6.3. Niveau des facteurs.....	48
I.1.6.4. Réponses.....	49
I.1.6.5. Matrice des expériences (Plan de mélange).....	50
I.1.6.6. Pesage et étiquetage	51
I.2. PREPARATION DE SABLE NORMALISER	51
I.3. PREPARATION DU MILIEU AGRESSIF	53
I.4. EAU UTILISER.....	53

CHAPITRE II : METHODE ET PROTOCOLE D'ESSAIS

II.1. INTRODUCTION	54
II.2. LES ESSAIS DE CARACTERISATION	55
II.2.1. Le sable.....	55
II.2.2. Le ciment	56
II.3. FORMULATION DES MORTIES	59
II.3.1. Confection des éprouvettes.....	59
II.4. LES ESSAIS MECANIQUES.....	60
II.4.1. La résistance à la traction par flexion	60
II.4.2. La résistance à la compression	60
II.5. ESSAI DE DURABILITE .ATTAQUE DES MORTIES PAR L'ACID SULFIRIQUE.....	61
II.6. CONCLUSION	61

SOMMAIRE

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1. CARACTERISATION DU SABLE	62
III.1.1. Equivalant de sable avant la normalisation	62
III.1.2. Analyse granulométrique du sable normalisé.....	62
III.2. CARACTERISATION DES CEMENTS FABRIQUES ET LEURS COMPOSANTS.....	63
III.2.1. Caractérisation des composants cimentaires.....	63
III.2.2. Caractérisation des mélanges du ciment	64
III.3. L'EAU DE GACHAGE	64
III.4. CONCLUSION	65

TROISIEME PARTIE *RESULTATS ET INTERPRETATIONS*

CHAPITRE I : LES RESULTATS OBTENUS

I.1. INTRODUCTION	67
I.2. LES RESULTATS MECANQUES.....	67

CHAPITRE II : MODELISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

II.1. ANALYSE ET COMMENTAIRE DES RESULTATS (RESISTANCES A LA COMPRESSION).....	72
II.1.1. La résistance à la compression à 2jour	72
II.1.2. La résistance à la compression à 7j	74
II.1.3. La résistance à la compression à 28j et 60j	76
II.2. ANALYSE ET COMMENTAIRE DES RESULTATS A LA FLEXION	80
II.2.1. La résistance à la traction par flexion à 2jour.....	80
II.2.2. La résistance à la traction par flexion à 7jour	82
II.2.3. La résistance à la traction par flexion à 28j	84
II.2.3. La résistance à la traction par flexion à 60j	86
II.3. ANALYSE ET COMMENTAIRE DES RESULTATS DE LA DURABILITE	88
II.3.1. La chute de résistance	88
II.3.2. La perte de masse	89
II.3.2. L'absorption.....	91

QUATRIEMME PARTIE *CONCLUSION*

I. CONCLUSION GANARALE.....	93
II. PERSPECTIVES	94

SOMMAIRE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95
-----------------------------------	----

INDEXE

III. Indexe des tableaux	99
IV. Indexe des figures	101
VI. Indexe des photos.....	103

INTRODUCTION

1. CONTEXTE

L'industrie de fabrication des liants hydrauliques (ciments) a été transformée par l'utilisation de déchets minéraux tels que, les fumées de silice, les cendres volantes et les laitiers de haut fourneau, comme ajouts cimentaire grâce à un avantage tridimensionnel économique, environnemental et fonctionnel dont le but de valoriser ces déchets sachant bien que ces ajouts minéraux ont des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques intéressantes.

Les propriétés d'un ciment sont étroitement liées à sa composition, par conséquent les propriétés d'un mortier au ciment avec ajouts minéraux sont influencées par la nature des ajouts utilisés, d'où la diversité des ajouts dans leurs composition chimique, minéralogique ainsi leurs réactivité, qui diffère d'un ajout à un autres à savoir actif ou non influence différemment les propriétés d'un mortier relativement à l'importance d'effet de chaque ajouts et la signification des interactions entre ajouts selon le type du ciment (binaire, ternaire, quaternaire...).

La majorité des études allant dans un sens relèvent une tendance vers l'utilisation des ajouts minéraux, c'est dans cette tendance qu'on a étudié un ciment avec ajout, on associant au clinker trois ajouts le laitier, le calcaire et la pouzzolane afin d'estimer l'influence des ajouts utilisés soit séparés ou regroupés sur la réponse mécanique et la durabilité du mortier testé.

La concrétisation de ce travail par les méthodes classiques pour déterminer

Les facteurs clés et les mélanges meilleures qui influence les propriétés mécaniques d'un ciment avec ajout demande un nombre d'essais très important est l'analyse des résultats demeure très complexe est nécessite des moyens d'expérimentation en matière de matériels et matériaux assez coûteux.

Etant ceci nous avons adopté la méthode des plans d'expérience pour l'étude de la réponse mécanique et la durabilité d'un mortier à base d'un ciment avec ajout, on exploitant des logiciels pour la réalisation de ce travail.

2. OBJECTIFS

Le principal objectif est d'étudier la réponse mécanique d'un mortier au ciment quaternaire à base de trois ajouts minéraux calcaire, pouzzolane et laitier associés au clinker et d'évaluer l'influence de chaque ajout et la signification de l'interaction double ou triple des ajouts sur les propriétés mécaniques et la durabilité du mortier testé.

L'intérêt de cette étude consiste à :

- Déterminer les facteurs clés dans la composition d'un ciment quaternaire
- l'amélioration de la réponse mécanique ainsi la durabilité du mortier au ciment quaternaire
- De mettre en évidence intérêt de la Valorisation des déchets minéraux dans l'industrie

3. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Le contenu du mémoire se repartit en 03 grandes parties :

La première partie : est destinée à l'étude bibliographique où nous avons donné un aperçu sur les travaux réalisés concernant le ciment, les ajouts minéraux avec leurs classifications et caractéristiques ; ainsi que quelques aspects affectant la durabilité des matériaux,

La deuxième partie : Est consacrée à l'expérimentation, nous présentons la méthodologie de préparation des ciments et du sable normalisé, l'établissement des plans d'expérience, les méthodes d'essais réalisés et la caractérisation des matériaux utilisés.

La Troisième partie : Présentation des résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation.

La dernière partie de la mémoire donne une conclusion générale qui met l'accent sur les principaux résultats et les perspectives en termes d'expérimentation pour meilleure compréhension aux ajouts minéraux.

première partie synthèse bibliographique



LE CIMENT

I.1. Historique :

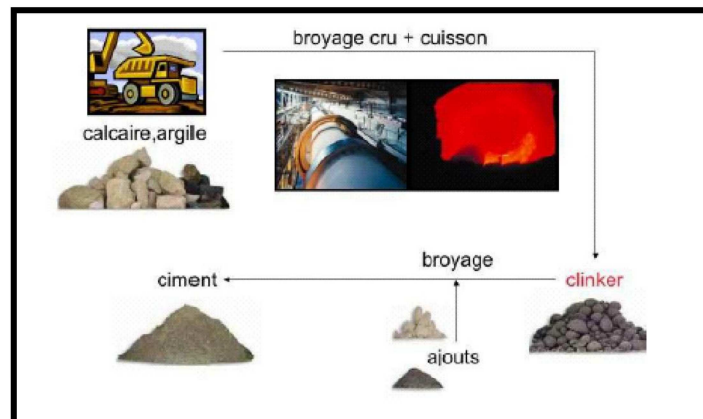
Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolanique », qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux.

En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexpliquée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née. Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspidine donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait les performances de la pierre de cette région [1].

I.2. Définition du ciment :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1550 C° (température de fusion) .Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. L'expression de << pâte de ciment durcissant >> sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide [2].

I.3. Etape de fabrication du ciment :



Figure(I.1) : Stades de fabrication du ciment [3].

I.3.1. Fabrication du clinker :

Le constituant principal de ciment est le clinker obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % et 20%.

I.3.2. Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, en éléments d'une dimension maximale de 150 mm dans des concasseurs situés en principe sur les lieux mêmes de l'extraction.



Photo(I.2) : concasseur de laboratoire d'Ain-kebira

I.3.3.Préparation de la matière première :

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le «cru». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant en faible proportion de la bauxite de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

I.3.4.Voie sèche :

C'est de très loin la technique la plus employée, aujourd'hui, en France. La matière première est préparée sous forme de parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre présentant la finesse requise. Cette poudre, le «cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

I.3.5.Autres techniques de préparation de la matière :

D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (vois demi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (vois semi-humide ou humide). Ces techniques, consommatrices d'énergie, ont été progressivement abandonnées en France au profit de la voie sèche [4].

I.3.6.Cuisson du cru :

Quelle que soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties :

-Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds provenant du four et circulant à contrecourant et se décarbonate en partie. Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (PR calcination). La poudre est ainsi portée à une température comprise entre 800 °C et 1000°C ;

-Un four horizontal rotatif cylindrique en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) De 50 à 90 m de long, de 4 à 5m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute.

La matière pénètre à l'amont du four (en partie haute) ou s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1450°C). Le temps de parcours est de l'ordre

d'une heure. Sous l'effet de la chaleur, les parcours est de l'ordre d'une heure, principalement composée de silice, d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium

-Tout en améliorant la quantité des produits, les industriels ont fortement réduit, au cours des dernières années, la consommation d'énergie nécessaire à la cuisson, de plus en plus apportée par des combustibles de substitution. En outre, l'industrie cimentière contribue aussi à la protection de l'environnement en valorisant les sous-produits industriels, inutilisables pour d'autres emplois. Les rejets des usines sont sensiblement inférieurs aux normes [5].

I.3.7.Broyage du clinker :

A la fin de cuissons, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment portland [6].



Figure(I.3) : Concassage de clinker [7].

I. I.4. Les constituants du ciment :

I.4.1. Le clinker :



Photo (I.4) : clinker après broyage.

Produit de la cuisson des constituants du ciment, à la sortie du four et avant broyage. Le clinker se présente sous forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc.

La composition des clinkers gris est en moyenne :

- Silicate tricalcique ($\text{SiO}_2 - 3\text{C}\square\text{O}$), en abrégé C_3S : 50 à 65%
- Silicate bi calcique ($\text{SiO}_2 - 2\text{C}\square\text{O}$), en abrégé C_2S : 15 à 20%
- Aluminate tricalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{C}\square\text{O}$), en abrégé C_3A : 5 à 15%
- Ferro-aluminate tétra calcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - 4\text{Cao}$), en abrégé C_4AF : 5 à 10%

La composition minéralogique du clinker obtenu après cuisson des matières crues est fonction de la composition du mélange mais aussi de la température de cuisson et des conditions de refroidissement (trempe à l'air)[8].

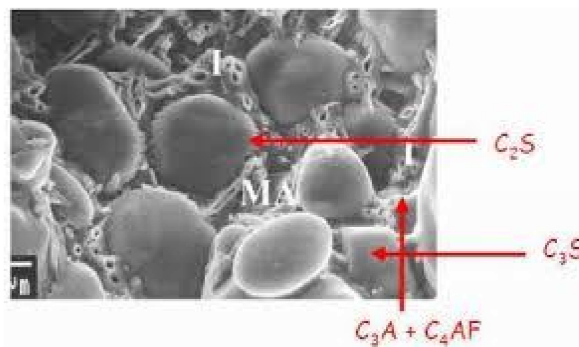


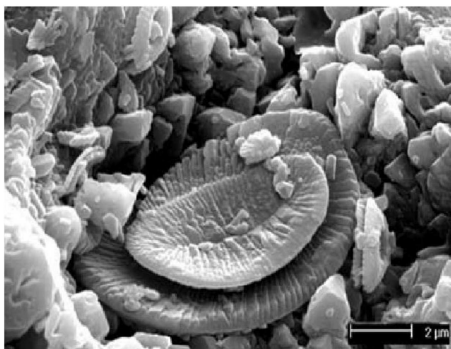
Photo (I.5) : Image par le MEB d'un clinker [9]

Tableau(I.1) : composition chimique et minéralogique du clinker [10].

Composants minéralogiques	Teneurs limites(%)	Teneur moyenne (%)
C_3S	40-70	60
C_2S	00-30	15
C_3A	02-15	08
C_4AF	00-15	08
Composition chimique		
Cao	60-69	65
SiO_2	18-24	21
Al_2O_3	04-08	06
Fe_2O_3	01-08	03
MgO	<05	02
$\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}_3$	<02	01

I.4.2. Le gypse :

Le gypse est la matière première utilisée pour la fabrication du ciment. Cette roche minérale s'est formée il y a 40 millions d'années grâce à l'évaporation de l'eau de mer. Le gypse est constitué en couches épaisses et se trouve aujourd'hui enterrée sous terre. Ces couches de gypse sont séparées entre elles par d'autres masses rocheuses. L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.



Figure(I.6) : Image de gypse par le MEB [11]



Photo (I.7) : le gypse après broyage

I.4.3. Les ajouts minéraux :

Les ajouts font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). D'autre part leurs utilisations ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement [12].



Photo (I.8) : les ajouts après le broyage.

I.5. Classifications du ciment :

I. 5.1. Classification des ciments en fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NFP15-301 et EN197-1. Ils sont notés par un chiffre qui pourrait intervenir trop rapidement [13].

CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (l'ancienne notation française est indiquée entre parenthèses) : _CEM I : ciment portland (CPA dans l'ancienne notation française). _CEM II : ciment portland composé (CPJ). _CEM III : ciment de haut-fourneau (CHF). _CEM IV : ciment pouzzolanique (CPZ). _CEM VI : ciment composé (ou ciment au laitier et aux cendres : CLC). La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau les constituants marqués d'une étoile(*) sont considérés [13].

Tableau(I.2) : désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [13].

	ciment portland	ciment composé portland		Ciment de haut-fourneau			ciment pouzzolanique		Ciment Composé	
	CPA CEM I	CPJ CEM 2/A	CPJ CEM 2/B	CHF CEM 3/A	CHF CEM 3/B	CLK CEM 3/C	CPZ CEM 4/A	CPZ CEM 4/B	CLC CEM 5/A	CLC CEM 5/B
Clinker (K)	≥95%	≥ 80% ≤94%	≥65% ≤79%	≥35% ≤64%	≥20% ≤34%	≥5% ≤19%	≥65% ≤89%	≥45% ≤64%	≥40% ≤64%	≥20% ≤38%
Laitier (S)	*	6%≤ Total	6%≤ total	≥36% ≤65%	≥66% ≤80%	≥ 81% ≤95%	*	*	≥ 18% ≤30%	≥31% ≤50%
Pouzzolanes (P ou Q)	*	≤20% (fumée De Silice ≤10%)	≤35% (fumée De Silice ≤10%)	*	*	*	11%≤ total	36%≤ total	18%≤ total	31%≤ total
Cendres siliceuses(V)	*			*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30% ≤50%	≤50%
Fumée de silice(D)	*			*	*	*			*	*
Cendres calcaires(W)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires Loul(L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont toujours considérés comme des constituants secondaires).

I.5.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours. Elles sont appelées <<classe 32,5 Mpa, <<classe 42,5 Mpa et <<classe 52,5 Mpa.

Chacune d'entre elles se divise en deux sous-classes <<N>> et <<R>>. La sous-classe <<R>> désigne des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garantie du tableau.

Les valeurs en italiques sont les valeurs garanties lorsqu'elles sont inférieures aux valeurs spécifiées. Les valeurs entre parenthèses sont celles indiquées par la norme NF P15-301 lorsqu'elles sont plus exigeantes que les valeurs indiquées par la norme européenne.

Tableau(I.3) : spécification et valeurs garanties en fonction de la classe [13].

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1(etP15-301)				Retrait à 28 jours (1) P15-433 ($\mu\text{m} / \text{m}$)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (mm)
	Au jeune âge		A28jours		P15-433	EN 196-3	EN196-3
	2jours	7jours	Mini	Maxi	($\mu\text{m} / \text{m}$)	(min)	(mm)
32,5 N		$\geq 16,0$ 14	$\geq 32,5$ 30	$\leq 52,5$	≤ 800	$\geq 75(90)$ 60(90)	≤ 10
32,5 R	$\geq 10(13,5)$ 8(12)		$\geq 32,5$ 30	$\leq 52,5$	≤ 1000	$\geq 75(90)$ 60(90)	≤ 10
42,5 N	$\geq 10(12,5)$ 10		$\geq 42,5$ 40	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60 50(60)	≤ 10
42,5 R	≥ 20 18		$\geq 42,5$ 40	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60 50(60)	≤ 10
52,5 N	≥ 20 18		$\geq 52,5$ 50			$\geq 45(60)$ 40(60)	≤ 10
52,5 R	≥ 30 28		$\geq 52,5$ 50			$\geq 45(60)$ 40(60)	≤ 10

(1) Le retrait spécifié ne concerne que les CEM 1 et les CEM2.

HYDRATATION DU CIMENT

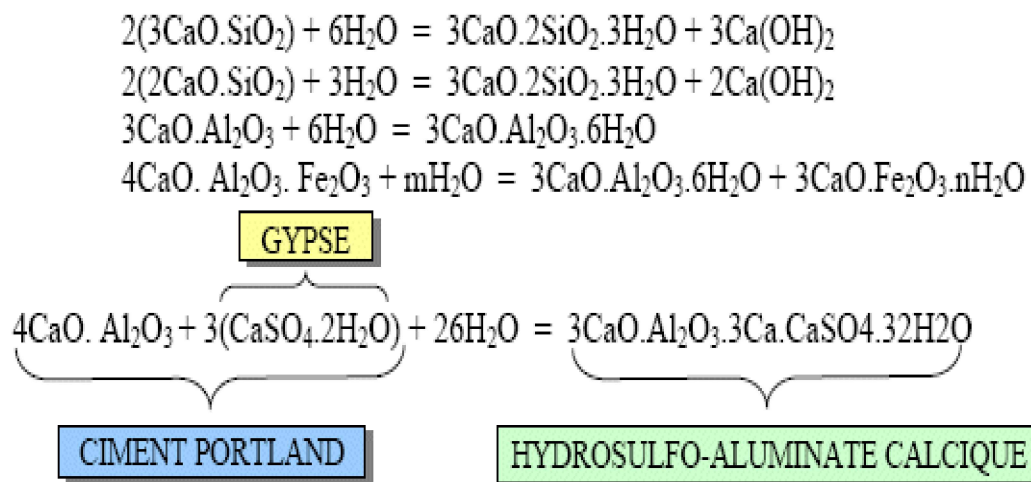
II.1. Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique .la réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pate qui ,après prise , durcit progressivement à l'air ou dans l'eau . Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent :

- La dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
 - La formation de solution sursaturée par rapport aux différents hydrates.
 - La précipitation et la cristallisation au phénomène de prise :
- de ces hydrates dans les vides inters granulaires [14].

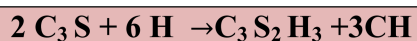
II.2. Hydratation des composants du ciment:

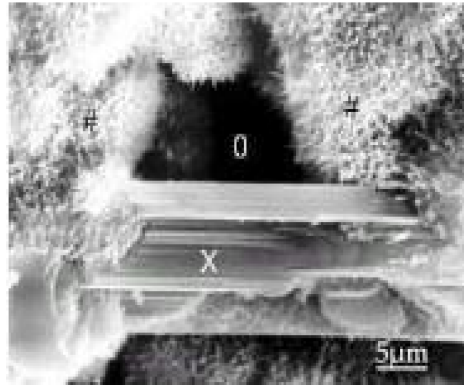
La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C3S, C2S, C3A, et C4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. L'hydratation du ciment Portland implique, nous venons de le voir, la réaction des quarts phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C3S, c'est l'hydratation du C3S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions. Principales réactions avec l'eau [15].



II.2.1. Hydratation du silicate tricalcique (C_3S) (alite) :

Le C_3S est le constituant majeur du clinker (50 à 70% de sa masse). Le C_3S confère rapidement au ciment une résistance élevée, son hydratation n'évolue pratiquement plus après 28 jours. La réaction du C_3S avec l'eau conduit à la formation de deux composés : Du silicate de calcium hydraté ou CSH (Calcium Silicate Hydraté), composé non stœchiométrique, dont le rapport CaO/SiO_2 varie autour de 3/2. Les forces de Vander Wall sont en partie responsables de la cohésion du gel CSH. Les CSH assurent les caractéristiques de cohésion des matériaux cimentaires et contribuent essentiellement à la résistance mécanique. La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH qui est un composé défini bien cristallisé, sous forme de larges feuillets hexagonaux, joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique. En présence de matériaux à propriétés pouzzolaniques, la portlandite se combine avec SiO_2 pour former du C-S-H cela entraîne une augmentation de la résistance du mélange. La portlandite (hydroxyde de calcium, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ occupe 20-25 % du volume de la pâte hydratée de ciment, c'est un produit soluble qui assure la stabilité du tampon basique des ciments ($\text{pH} < 12,4$). Cela crée un milieu favorable aux armatures métalliques. La réaction d'hydratation des silicates tricalciques peut être représentée, sans prendre en considération la complexité de la réaction, par l'équation suivante :





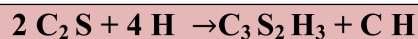
Figure(II.1): CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#),

La porosité est repérée par (O)[16].

II.2.2. Hydratation du silicate bicalcique C_2S (bélite) :

Il représente 15 à 30% de la masse du clinker. Les mécanismes et les produits d'hydratation du silicate bicalcique sont similaires à ceux dérivés de C_3S . En revanche, son hydratation est généralement plus lente et la production de portlandite plus faible il permet au contraire d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.

Lorsque le ciment est au contact de l'eau, les réactions au cours du gâchage forment des CSH en libérant des ions Ca^{2+} et OH^- , ces deux espèces se combinent et forment la portlandite.



II.2.3. Hydratation du C_3A :

Le C_3A est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C_4AH_{13} , C_2AH_8) qui se transforment en un aluminat de calcium hydraté C_3AH_6 .

L'aluminat tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. En l'absence de gypse, l'hydratation du C_3A est extrêmement rapide, exothermique et perturbe l'hydratation des silicates. Il s'en suit un phénomène de prise très rapide, empêchant la mise en œuvre du matériau. Pour remédier à cela, les cimentiers incorporent systématiquement du gypse dans la composition de leur ciment. Ainsi, la réaction des aluminates avec le sulfate contenu dans le gypse, forme de l'ettringite (AF) (tri sulfo-aluminat de calcium hydraté) qui précipite en masse autour du grain de C_3A et inhibe sa dissolution. Celle-ci, une fois le gypse totalement consommé, se

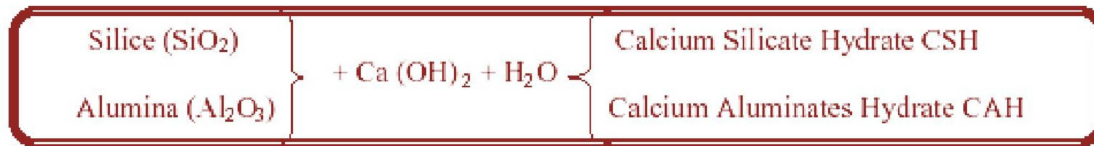
décompose pour former du monosulfoaluminate (AF_m). La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de C_3A par rapport au gypse [17].

II.2.4. L'hydratation du C_4AF :

L'hydratation du C_4AF est semblable à celle du C_3A , mais la vitesse de réaction est plus lente et les hydrates formés contiennent du fer. Les produits de réactions sont les mêmes que ceux issus du C_3A en substituant aux aluminates des aluminoferrites. Le C_4AF a pour rôle de réduire la température de formation du clinker, il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance mécanique [17].

II.3. Hydratation et réaction pouzzolanique :

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogiques différentes. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO , ce qui est le contraire pour le ciment portland. Par conséquent, l'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO_2 de la pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à $Ca(OH)_2$ créée par l'hydratation du ciment portland [17]. Les pouzzolanes ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et aluminat de calcium hydraté développant des résistances. La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker portland (CSH , C_4AH_{13} , C_8AFH_{26} , $C_6AS_3H_{32}$). Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée. Au cours de l'hydratation du ciment portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du CSH), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. La situation est différente en présence de pouzzolanes. Le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminat de calcium hydraté (CAH). Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes [18].



II.4. Hydratation du laitier :

Les laitiers du haut fourneau sont des matériaux hydrauliques les plus utilisés car leur production est très importante et leurs propriétés sont stables, comparées à celles des autres sous-produits industriels. Plus de cent ans d'expérience sur les ciments aux laitiers du haut fourneau a montré clairement leur efficacité dans la confection des structures en béton, et en particulier les structures maritimes [19].

Seul le laitier granulé est utilisé en cimenterie. Il est ajouté au moment du broyage aux autres constituants (clinker, gypse). Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (90 % et plus) de quatre oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) et contenant en quantité insignifiante des oxydes TiO_2 , MnO , FeO et les sulfures CaS , MnS , FeS . 63

II.5. Conclusion :

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

LES AJOUTS MINÉREAUX

III.1. Généralité :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la Composition du béton. Des ajouts, tels que les cendres volantes le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, les fillers etc., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz [20].

III.2. Classification des ajouts :

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (III.1) ci-dessous.

Tableau (III.1) : Classification des ajouts selon leur réactivité [21].

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres à diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

III.2.1.Principaux ajouts minéraux inertes :

III.2.1.1.fillers calcaire :

La notation « filler » regroupe les granulats dont le diamètre n'excède pas 0,09 mm. Les fillers calcaires sont issus du broyage des roches naturelles calcaires comme la calcite ou la dolomite. Ces particules étant plus petites que les grains de ciment, elles vont optimiser l'arrangement granulaire, diminuant ainsi la porosité à l'état durci. Par contre, la présence de carbonate (dont la teneur varie en fonction de l'origine des roches) peut favoriser la formation de thaumasite au cours de l'attaque sulfatique sous certaines conditions. Ainsi, Gonzalez and Irassar (1998) concluent que, dans le cas de l'attaque sulfatique, l'addition de fillers calcaires peut avoir un rôle inhibiteur ou bien au contraire accélérateur en fonction de divers paramètres comme les conditions expérimentales, les compositions de ces additions ainsi que leur taux de substitution au liant[22].



Photo(III.1) : calcaire après le broyage

III.2.2.Les ajouts minéraux actifs :

III.2.2.1.La pouzzolane :

III.2.2.1.A. Définition :

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la

réduction des réactions alcalins-agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.

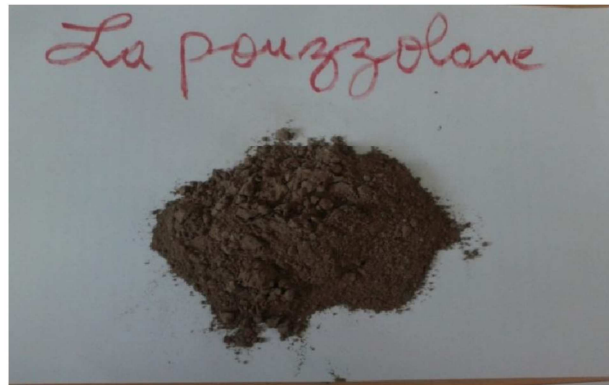
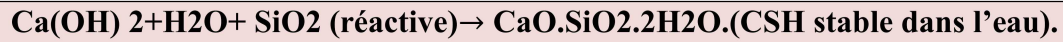


Photo (III.2): pouzzolane après broyage

III.2.2.1.B.Types de pouzzolane :

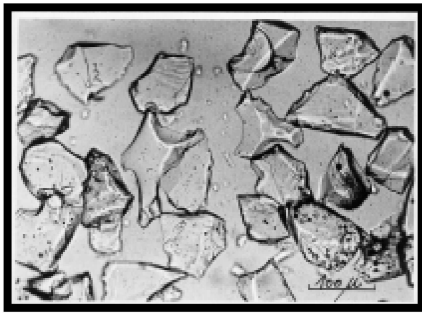
- **Pouzzolane naturelle :**

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618). [23]

- **Pouzzolane artificielle :**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [23].

III.2.2.2. Le laitier de haut fourneau :



Figure(III.3) : le Laitier [24].



Photo(III.4) : laitier après le broyage

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer plus pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 μm pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques [25].

III.2.2.2.A. Composition chimique :

La composition du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minerai. Généralement.

Tableau(III.2) : la composition chimique moyenne du laitier [26].

Constituants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	Fe ₂ O ₃ + FeO
%	30 -50	28-38	12 - 25	02 - 18	01 – 03	1 - 2.5	1 - 2.5

III.2.2.2.B. Composition minéralogique :

Si le refroidissement des laitiers est lent, une partie sensible de laitier réussit à se cristalliser sous forme de minéraux stables.

- L'anorthite $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

- Diopside $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Gehlenite $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Akermanite $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Merwinite $3 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Silicate bi calcique sous forme C_2S .
- Tri aluminate penta calcique « C_5A_3 »
- Wollaston ite $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- Rankinite $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Spénelle $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. [27].

III.3.L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile+calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles. Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisés dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments CPA. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus [28].

• III.3.1. Economique :

-la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.

-comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible [29].

- **III.3.2. Technique :**

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration [30].

- **III.3.3. Ecologiques et environnementaux :**

-diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
-élimination des sous-produits de la nature. La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique. De fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de LGHF (laitier granulé de haut fourneau) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment [29].

III.5. Conclusion :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques et économiques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent

positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

Effets des ajouts minéraux sur les performances mécaniques Et la durabilité des matériaux

IV.1.Introduction :

Aujourd'hui, l'un des principaux enjeux du Génie civil consiste à pouvoir garantir une stabilité, ou du moins une maîtrise, dans le temps des propriétés mécaniques d'un ouvrage dans son environnement. Cet enjeu, le développement durable, concerne les structures futures ou en cours de conception, mais aussi les réalisations actuelles. Il implique à la fois une prise en compte du comportement durable constituant la structure et un suivi de l'ouvrage au cours de son exploitation. Le but est de pouvoir prédire et garantir une durée de vie d'un ouvrage autrement que par des critères conventionnels. Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être exposé. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité. Il est utile d'ajouter que le concept de durabilité ne signifie pas une durée de vie infinie, Pas plus qu'il ne signifie que le béton doit résister à n'importe quelle agression. De plus, on constate maintenant, ce qui n'était pas toujours le cas auparavant que dans des cas, un entretien régulier du béton est nécessaire [30].

IV.2.La perméabilité :

C'est la possibilité des matériaux de laisser une pénétration de l'eau sous pression (les matériaux compacts ne sont perméables).

La perméabilité à l'eau du béton durci dépend fondamentalement de la porosité capillaire de la pâte de ciment qui, à son tour est tributaire du rapport eau/ciment ainsi que du vieillissement du béton. Dans la pratique, il s'avère cependant que l'étanchéité est encore bien plus largement fonction des joints, raccords, fissures et compactages imparfaits.

La capacité d'absorption détermine l'étanchéité sur le béton durci et séché. Il est considéré comme étanche lorsque la perméabilité est inférieure à la quantité d'eau évaporable sur la surface exposée à l'air [31].

IV.3. L'alcali réaction :

Les phénomènes d'alcalis-réactions sont le résultat d'une réaction chimique complexe se développant entre certains types de granulats, contenant des formes de silice réactive (silice amorphe ou crypto cristalline), et les alcalins du béton, en présence d'humidité. Ils s'accompagnent de la formation de gels silico-calco alcalins expansifs. On observe les typologies suivantes :

fissurations en macro faïençage, souvent souligné par des traces d'humidité et des exsudations de gels, fissurations orientées dans le sens des contraintes pour les parties d'ouvrage pré ou post contraintes, formation de cônes d'éclatement lorsque l'on a affaire à certaines espèces à cinétique de réactivité très rapide contenues dans des granulats proches du parement.

Ces phénomènes ont été rencontrés, en France, dans tous les types d'ouvrages : barrages, ouvrages d'art (piles de ponts, culées, tabliers), balcons, garde-corps, structures précontraintes, fondations, pré dalles précontraintes, dalles au sol.

Les granulats sont classés suivant leur réactivité, comme étant :

- Potentiellement réactifs (PR): c'est-à-dire ayant une réactivité importante.
- Potentiellement réactifs à effet de pessimisme (PRP) : s'ils ont une très forte réactivité lorsque leur teneur est dans un certain intervalle,
- Non réactifs (NR) : si leur réactivité est très faible [32].

IV.4. La lixiviation en eau douce :

En ce qui concerne le béton on parle plus généralement de lixiviation qui, dans sa définition première, est une opération qui consiste à faire passer lentement un solvant à travers un matériau en couche épaisse afin d'en extraire un ou plusieurs constituants solubles. C'est le terme souvent employé pour décrire le phénomène d'extraction progressive des ions calcium (dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et décalcification des C-S-H) lors de la percolation des solutions agressives dans le béton. La lixiviation peut être décrite comme une dissolution progressive résultant d'une succession d'états d'équilibre entre les hydrates et la solution : au fur et à mesure que les ions agressifs arrivent au contact des hydrates, l'équilibre entre ces hydrates et la solution interstitielle est rompu ; mais il est aussitôt rétabli par une nouvelle dissolution des hydrates et/ou par la précipitation d'un nouveau composé selon que la solution est sous-saturée ou sursaturée par rapport à ce composé. Le terme de « lessivage » parfois employé, a un sens analogue. Les composés précipités peuvent être nocifs ou non vis-à-vis de la durabilité du béton [33].

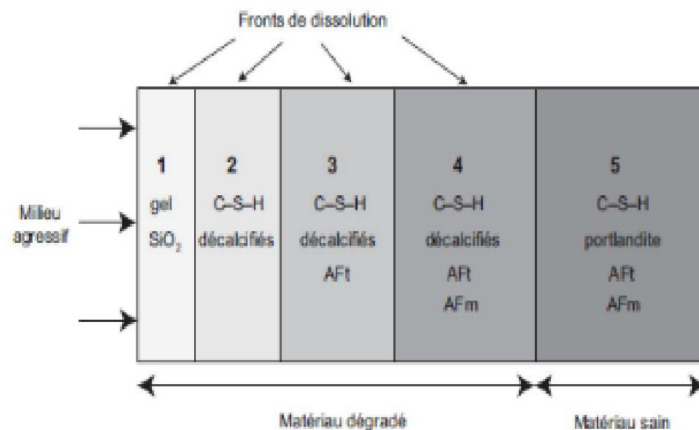


Figure (IV.1.) : Représentation schématique de la dégradation d'une pâte de ciment soumise à la lixiviation par une eau pure déminéralisée stabilisée à pH 7 [34].

IV.5. Action des sels :

De très nombreux sels attaquent la pâte de ciment durcie en formant des sels solubles dans l'eau, lesquels sont lessivés. Tous les sels de magnésium, à l'exception du sulfate de magnésium très difficilement soluble dans l'eau sont ainsi à même de remplacer les ions de calcium dans la pâte de ciment durcie. Il se forme à la surface du béton de l'hydroxyde de magnésium et des silicates de magnésium, qui empêchent une autre attaque. L'hydroxyde de magnésium se présente toutefois sous forme de masse molle, gélatineuse, qui est emportée par l'eau coulant plus rapidement [35]. Les sels d'ammonium dissolvent surtout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la pâte de ciment durcie, ce qui engendre de l'ammoniac. Pour le chlorure d'ammonium:

Hydroxyde de calcium + chlorure d'ammonium chlorure de calcium + ammoniac

L'ammoniac libéré, une base se dissout dans l'eau. Il n'attaque pas le béton. Le carbonate d'ammonium et le fluorure d'ammonium, qui engendreraient du carbonate de calcium et de fluorure de calcium, des composés difficilement solubles, ne sont pas dangereux pour la pâte de ciment durcie [35]. Contrairement à l'armature, la pâte de ciment durcie n'est altérée par les ions de chlorure que s'ils sont fortement concentrés. Dans l'eau de gâchage, les chlorures accélèrent l'hydratation du clinker Portland encore existant. Par réaction avec les aluminates hydratés, les ions de chlorure se transforment en chloroaluminates difficilement solubles, par exemple $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, partiellement fixés dans le béton [35].

IV.6. Action des bases :

Les bases sont en général peu nuisibles pour le béton. Les bases fortes, telles que l'hydroxyde de sodium ou de potassium, réagissent toutefois avec les composés d'aluminates hydratés, en particulier avec l'aluminium tricalcique hydraté.

Le ciment Portland ne contenant que peu d'aluminates, ces réactions sont d'importance secondaire. Avec l'hydroxyde de sodium, on a observé que des solutions à 10% avaient pour effet d'augmenter la résistance ; ce n'est qu'à partir de concentrations à 25% que les bases entraînent d'importantes pertes de résistance [36].

IV.7.Action des sulfates :

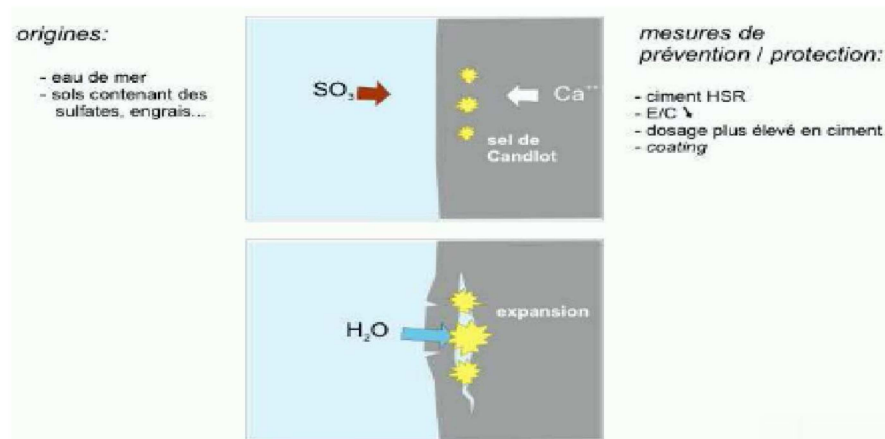
Le béton est un matériau poreux. L'eau de l'extérieur peut pénétrer dans son réseau de pores et de capillaires et apporter avec elle des ions agressifs qui peuvent réagir avec les hydrates et changer leur structure.

Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée

Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles [36].

IV.7.1. Mécanismes d'attaques :

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfatique.



Figure(IV.2): L'attaque par les sulfates. [3529]

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion ;
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

IV.8. Action des acides :

IV.8.1. Introduction :

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques: l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques. L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont [37]:

- les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agro – alimentaires
- les réseaux d'égouts.

IV.8.2.Sources des acides :

Les effluents des fours utilisant des combustibles riches en soufre et effluents des industries chimiques peuvent contenir de l'acide sulfurique. La décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage peut conduire à la formation de H₂S (gaz) qui peut être transformé en acide sulfurique par l'activité bactérienne.

De façon générale, l'attaque chimique du béton prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles peuvent être lessivés et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être préjudiciables in situ.

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est l'hydrate le plus vulnérable, mais les CSH peuvent aussi être attaqués.

Le béton peut être attaqué par des liquides dont le pH est inférieur à 6.5, mais cette attaque ne devient grave que pour des pH inférieur à 5.5 ; en dessous de 4.5, l'attaque devient très sévère.

Le béton est aussi attaqué par l'eau contenant de CO_2 libre, telles les eaux minérales, qui peuvent aussi contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le CO_2 n'est pas agressif par ce qu'une partie de ce CO_2 est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium dans la solution.

Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer de la dégradation de la surface exposée du béton.

Quoique les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, on a observé dans plusieurs cas, d'importants désordres dans des égouts, en particulier à des températures assez élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en H_2S par des bactéries anaérobies.

Ce composé n'est pas en lui-même un agent destructeur, mais il est dissout par le mince film d'humidité recouvrant la surface du béton et subit une oxydation par les bactéries anaérobies, ce qui produit finalement de l'acide sulfurique. L'attaque apparaît donc au-dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation. La pâte de ciment durci est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton. Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer.

L'acide sulfurique est un acide très agressif qui réagit avec la chaux libre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le béton et forme une gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton par un facteur de 2.2. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble de produit de réaction [37].

Ces composés très expansifs causent la pression interne dans le béton, qui mène à la formation aux fissures. La surface corrodée devient molle et blanche. Quand la corrosion continue, la structure en béton corrodé perd sa propriété mécanique. La diminution du dosage du ciment dans le béton peut être bénéfique, à condition, bien sûr, que la masse volumétrique du béton reste intacte.

IV.8.3.Mécanisme d'attaque :

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou

l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. Le tableau (IV.1.) mentionne les composants du béton menacés par la corrosion.

Tableau (IV.1.): Composants du béton menacés par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca(OH)₂
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	3CaO·2SiO₂·3H₂O
	Aluminate de calcium hydraté	3CaO·Al₂O₃·6H₂O
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	6CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃·12H₂O
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO₃
	Dolomite	CaMg(CO₃)₂
	Grès amorphe	SiO₂·xH₂O

On distingue deux types de détérioration:

- i- L'agression résolvante ;
- ii- Le gonflement [38].

IV.9.Influence des ajouts sur les performances mécaniques :

- El-Khadiri et Al. [39] ont étudié le comportement mécanique des mortiers contenant à la fois des cendres volantes et du calcaire (ajout inerte).il on a trouvé que la substitution du clinker par le calcaire a donné des meilleures résistances mécaniques que celles des mortiers contenant des cendres volantes au jeune âge. Après 28 jours, le ciment contenant des cendres volantes a donné des résistances importantes. Du point de vue mécanique, ces auteurs ont opté pour un dosage optimal composé de 77.5% de clinker, 2% de gypse, 7.5% de cendres volantes et 13% de calcaire.

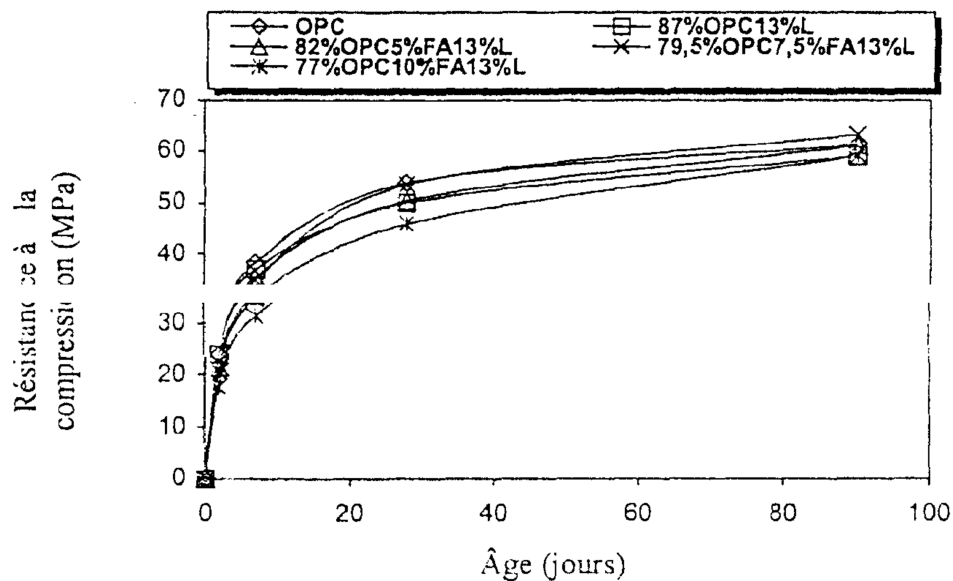


Figure (IV.3) : Développement de la résistance en fonction de l'âge [39]

- Menendez et al. [40] ont étudié le développement de la résistance des liants ternaires contenant des fillers calcaires et du laitier. Ils ont trouvé que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire. Les fillers calcaire améliorent la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme par la réaction pouzzolanique qui raffine les systèmes de pore. Ils ont montré que le mélange de ciment ternaire offre un avantage par rapport aux ciments binaires et aux ciments Portland sans ajouts. Ces auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment Portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire.
- Khan et Lynsdale [41] ont étudié l'effet des systèmes de ciment binaires et ternaires à base de ciment Portland ordinaire (OPC), les cendres volantes pulvérisées (PFA) et les fumées de silice (FS) sur les performances des bétons. Ils ont constaté que l'incorporation de 8-12% de fumée de silice rapportait les valeurs optimales de résistance. L'incorporation de FS a augmenté la résistance au jeune âge pour tous les mélanges, compensant la perte de résistance causée par l'incorporation de PFA. Les mélange de béton contenant 30% PFA et plus avec ou sans FS ne pouvaient pas atteindre la résistance du béton contrôle.

IV.10. Influence des ajouts sur l'absorption (sportivité) :

- Tasdemir [42] a étudié les effets combinés des additions et des conditions de cure sur la sportivité et la résistance à la compression du béton de CPA 42.5. Il a évalué le coefficient

de sorptivité pour des bétons contenant des ciments avec les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et de la fumée de silice (SF). Il a étudié aussi le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression des bétons avec un CPA 32.5. Il a prouvé que les additions minérales sont bénéfiques pour l'augmentation et la réduction de l'absorption capillaire du béton.

- Tsivilis et Al. [43] ont étudié l'effet de l'addition du calcaire sur la sorptivité des bétons. Ils ont constaté que le béton contenant le ciment au calcaire a donné des valeurs de sorptivité légèrement plus basses, comparées au béton contenant le ciment sans ajout. Ils ont trouvé que la sorptivité du béton contenant le ciment au calcaire a varié de 0.220 à 0.238 mm/min^{0.5} avec l'augmentation du niveau de substitution du calcaire de 10 à 20%, alors que le béton contenant le ciment sans ajout a présenté une sorptivité de 0.237 mm/min^{0.5}. Ces auteurs ont conclu que l'addition de calcaire affecte d'une manière positive l'absorption de l'eau du béton. Ils ont noté que le coefficient de sorptivité estimé évalue seulement les grands pores capillaires, en raison de la grande valeur de E/C des bétons étudiés.

IV.11.Influence des ajouts vis-à-vis des attaques sulfates :

- O 'Farrell et coll. [44] ont étudié l'expansion des mortiers contenant de la brique broyée, exposés à une solution de 2.1% de sulfate de sodium (Na_2SO_4). Ils ont utilisé quatre types de briques dont les compositions chimiques et minéralogiques sont différentes. Ils ont trouvé que les briques dont la phase vitreuse a une teneur élevée en calcium (CaO) ou une faible proportion de phase vitreuse ne devraient pas être employées comme pouzzolanes, et les briques avec une proportion élevée en verre de faible teneur en calcium font des pouzzolanes très efficaces.
- Une étude faite par Janotka et Krajci [45] sur l'augmentation de la résistance aux sulfates des mortiers contenant 15% de zéolite (pouzzolane naturelle) au ciment, pour cela ils ont utilisé trois types de ciments : ciment Portland type CEM I 42.5 (PC), ciment résistant aux sulfates (SRPC), et un ciment à base de zéolite naturelle (PPC). Ils ont laissé les mortiers dans l'eau pure et dans une solution de 5% Na_2SO_4 pendant 365 jours. Ils ont constaté une diminution de 32.6% de la résistance à la compression des mortiers de PC immergés pendant 365 jours dans la solution Na_2SO_4 comparés à ceux conservés dans l'eau. En revanche, ils ont observé une augmentation de 10% et 2.6% de la résistance à la compression des mortiers de SRPC et de PPC respectivement.
- Mulanga et coll. [46] ont substitué le ciment Portland par l'addition des cendres volantes et ils ont suivi l'effet de cet ajout sur la résistance des mortiers aux attaques chimiques

sulfatiques. Les échantillons ont été exposés à une solution de 5% Na_2SO_4 . Ils ont trouvé, après 84 jours d'immersion, que les expansions des échantillons de mortiers contenant 30%, 40% et 50% de cendres volantes sont inférieures à l'expansion des mortiers témoins.

- Une étude expérimentale de S.T. Lee et coll. [47] a montré que la fumée de silice substituée à une partie de ciment a un effet bénéfique sur la perte de résistance due à l'attaque par les sulfates. L'incorporation de 5 à 10% de la fumée de silice comme substitution au ciment donne de meilleurs résultats de la résistance de la pâte de ciment durcie dus à l'attaque des sulfates. Ils ont traité l'effet de l'ajout de la fumée de silice sur la résistance des mortiers dans des environnements sulfatiques ; le sulfate de sodium et le sulfate de magnésium. Les différentes compositions du ciment sont : OPC (ciment Portland ordinaire) sans ajout et OPC avec 5%, 10% et 15% de fumée de silice. Ils ont conclu que le ciment avec la fumée de silice comme ajout présente moins de perte de résistance que le ciment sans ajout.
- L'étude expérimentale faite par Y. Senhadji [48] a montré que la substitution de 15% de pouzzolane de Beni-Saf au ciment Portland artificiel (CPA) Zahana permet une réduction de perte de masse de 19% et de 3% des mortiers immergés respectivement dans une solution de 5% de Na_2SO_4 et 5% de MgSO_4 par rapport aux mortiers contrôles pendant une période d'immersion de 180 jours.

IV.12. Influence des ajouts vis-à-vis des attaques acides :

- L'étude faite par Sayamipuk [49] a montré l'influence du métakaolin sur la résistance des mortiers à l'attaque des acides (5% HCl et 5% H_2SO_4). Les pourcentages de substitution dans le poids pour les mortiers contenant le métakaolin, immergés dans HCl étaient inférieurs à ceux immergés dans H_2SO_4 . Plus le pourcentage de métakaolin augmente, plus la résistance à l'attaque acide est haute, la résistance de l'attaque acide a été réduite lorsque le rapport eau/liant diminuait.
- L'étude faite par A.AliAichouba [30] a montré l'influence de l'ajout de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur la résistance des mortiers à l'attaque des acides (1% HCl et 2% H_2SO_4). Elle a constaté qu'après 60 jours d'immersion, les mortiers qui contiennent différents pourcentages de la pouzzolane naturelle, augmentent leur aptitude à résister aux acides.

À 105 jours d'immersion, l'incorporation de 30% de pouzzolane naturelle réduit les pertes de masse de 61% par rapport au mortier contrôle. La perte de masse est due au fait que le ciment Portland après hydratation a libéré une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre (CH) qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'acide.

- S. Mansour [50] a étudié l'effet des ajouts minéraux (pouzzolane naturelle, fumée de silice et fines calcaires) sur la résistance aux attaques acides des mortiers. Il a suivi la perte de masse (selon NORME ASTM C-267) des spécimens de mortiers de dimensions 40x40x80 mm³ immergés dans deux solutions acides 1% HCl et 3% H₂SO₄ durant une période d'immersion de 180 jours.

La réduction de la perte de masse des spécimens des mortiers avec ajouts a été évaluée par rapport aux mortiers contrôles confectionnés à base de C.P.A provenant de la cimenterie d'Oued-Sly (ECDE). Le tableau (IV.2) résume les résultats de l'étude.

Tableau (IV.2): Mesure d'expansion des barres de mortier [50]

Notation	C70P30LO	C85POL15	C90POF10	C70P20L10	C70P20F10
Taux de substitution de l'ajout	30% pouzzolane 0% calcaire	0% pouzzolane 15% calcaire	0% pouzzolane 10% fumée de Silice	20% pouzzolane 10% calcaire	20% pouzzolane 10% fumée de silice
Taux de réduction d'expansion 5% Na ₂ SO ₄	55%	36%	83%	40%	84%
Taux de réduction d'expansion 5% MgSO ₄	45%	21%	63%	18%	64%

- Y.Senhadji [48] dans son étude a confirmé l'apport bénéfique des ajouts sur la résistance des mortiers aux attaques acides. Il a suivi la perte de masse des mortiers cubiques de dimensions 50x50x50 mm³ conservés dans trois milieux différents : 5% HCl, 5% H₂SO₄ et 5% CH₃COOH pendant 28 jours. La réduction de perte de masse des mortiers a été

évaluée par rapport aux mortiers contrôles formulés à base de C.P.A provenant de la cimenterie de Zahana. Les résultats de l'étude sont résumés au tableau (IV.3).

Tableau (IV.3): Réduction de perte de masse des mortiers cubiques [42]

Notation	Taux de substitution de l'ajout	Réduction de perte de masse en %		
		5% HCl	5% H ₂ SO ₄	5% CH ₃ COOH
MZ15	15% pouzzolane	8	37.3	30
MZ30	30% pouzzolane	19.4	58.2	32
MF15	15% fillers calcaire	7.1	2.1	2.2
MF30	30% fillers calcaire	8.7	5.3	5.3

IV.13.Conclusion :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, les ajouts minéraux actifs tels que pouzzolane naturelle, fumée de silice, laitier de hauts fourneaux...etc., et inertes tels que fillers calcaire ont un apport bénéfique sur les propriétés de durabilité des mortiers et bétons réalisés à base de ciments avec ajouts. Leurs substitutions à des taux optimaux bien étudiés aux différents ciments contribuent à la résolution de pas mal de problèmes de dégradations des bétons dans le domaine de Génie Civil. Les ajouts minéraux confèrent donc aux bétons et mortiers :

- Une diminution de perméabilité à l'eau.
- Une diminution d'absorption à l'eau.
- Une bonne résistance mécanique.
- Une bonne résistance aux sulfates.
- Une bonne résistance aux acides.

Plans d'expériences

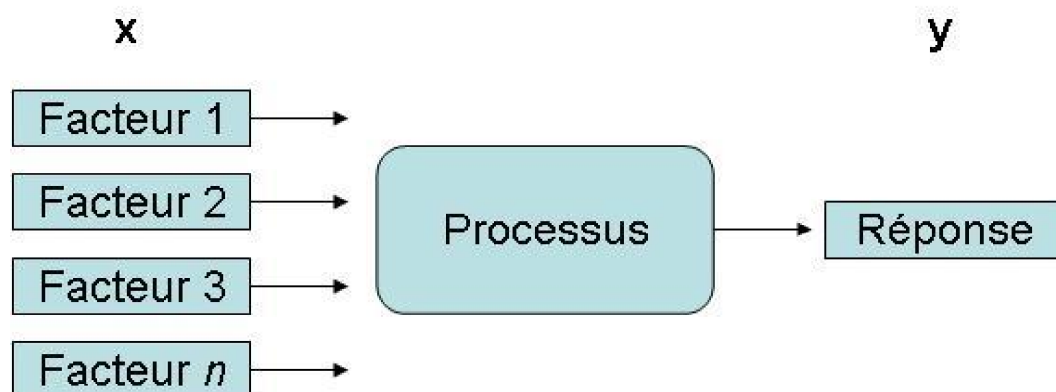
VI.1. Introduction :

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le nombre de mélanges à préparer, qui répondent correctement à nos attentes, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Pour cela et avant d'entamer la procédure de la détermination de nos mélanges, nous rappelons ci-après les différents types de plans d'expériences, leurs domaines d'utilisation ainsi que leur démarche.

Dans les années trente, les premiers plans d'expériences structurés ont vu le jour en agronomie. Ces plans se sont développés au cours des dernières années et leur utilisation s'est étendue pour intéresser, finalement, tous les secteurs de production et de compétitivité.

VI.2. 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. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques. Le diagramme résume de manière plus simple cette définition [50].



(Figure I.6) :vocabulaire d'un plan d'expérience

VI.3. Intérêts des plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- Industries des matériaux.
- industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- industries mécaniques et automobiles
- industries métallurgiques

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.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié [51].

VI.4. Terminologie

Avant d'entamer l'élaboration du plan d'expérience, la connaissance d'une certaine terminologie qui lui est associée revêt une importance primordiale [51].

.

- **Facteurs** : Un facteur est un paramètre que l'on peut varier d'une expérience à une autre, et qui influence le résultat final (réponse). Le nombre de facteurs entrant en jeu est, couramment, supérieur à celui des réponses. Deux types de facteurs sont distingués :
 - Facteur quantitatif : tout facteur mesurable. Sa variation est soit continue, à savoir le dosage en cendres volantes, en CBG ou en fillers de calcaire, soit discontinue dans le cas de classes de ciment par exemple.
 - Facteur qualitatif : tout facteur non mesurable tel que la nature de granulats ou leur type.

- **Niveau des facteurs** : C'est la délimitation du domaine de variation d'un facteur donné. En général, la variation de chaque facteur est délimitée par deux niveaux : supérieur et inférieur.
- **Domaine expérimental** : Le domaine expérimental est schématisé par un polyèdre à k dimensions, où k est le nombre de facteurs considérés. Chaque côté de ce polyèdre, est défini par les deux niveaux extrêmes caractérisant le facteur correspondant à ce côté.
- **Réponses** : Les réponses sont les propriétés à mesurer pour la variation d'un facteur.
- **Effet** : L'effet d'un facteur X sur une réponse Y est obtenu en étudiant les variations des valeurs de Y en fonction de celles de X . Si le facteur X a une interaction avec lui-même, on parle d'un effet quadratique. Un effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le coefficient multiplicatif de X dans un modèle mathématique de la réponse. La signification de l'effet de X sur Y est donnée par des tests statistiques.
- **Interaction** : On dit qu'il y a interaction entre deux facteurs X et X' si l'effet de X dépend du niveau de X' et inversement. Cette interaction est notée interaction XX' ou interaction $X'X$.

VI.5. Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

VI.5.1. La recherche des facteurs influents

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié; la question est de savoir quels sont les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse :

- ✓ Lesquels ont une influence significative ?
- ✓ Que vaut cette influence ?
- ✓ Et y a t il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe à la seconde étape.

VI.5.2. La modélisation

Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe.... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents.

La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets

VI.5.3. L'optimisation

Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié [52].

VI.6. Différents types de plans d'expériences

Trois grandes familles de plans d'expériences sont présentes :

VI.6.1. 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.

Pour étudier k facteurs, sur la base des plans factoriels à deux niveaux, il faut réaliser 2^k essais, d'où le nom de plans 2^k donné à cette famille de plans.

La matrice des essais comporte k colonnes et 2^k lignes. Elle se construit de la façon suivante :

- Colonne du 1er facteur : alternance de -1 et +1.
- Colonne du 2ème facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3ème facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
-

Le domaine expérimental est présenté dans l'espace des facteurs à k dimensions. Les points expérimentaux sont situés aux sommets du polyèdre [52].

VI.6.2. 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.

Un plan factoriel complet comporte 2^k essais et permet d'estimer, non seulement les effets des facteurs, mais aussi toutes leurs interactions possibles. De ce fait, on est toujours amené à faire plus d'essais pour collecter moins d'informations car les interactions d'ordre supérieur ou égal à 2 sont négligeables et ne peuvent rien nous apporter.

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 aliasés « confondus » délibérément, c'est-à-dire qui ont des niveaux de même alternance dans la matrice des expériences [52].

VI.6.3. Plans de mélange

La démarche générale des plans de mélange consiste à traduire la variation d'une réponse en fonction des constituants du mélange par la relation $Y = f(X_i)$ avec $X_i = 1$ et i varie entre 1 et k (le nombre total de facteurs) [52].

VI.6.3.1. Modèles représentatifs d'un mélange :

Pour traduire les variations d'une réponse en fonction de la composition du mélange, il existe plusieurs modèles, à savoir le modèle linéaire, le modèle quadratique, le modèle spécial cubique... Pour élaborer un tel modèle de degré n avec k constituants, le réseau Scheffé (k, n) propose de choisir les teneurs en X_i du mélange suivant la série $0, 1/n, 2/n, \dots, n/n$; ainsi on aura autant de mélanges différents que de coefficients à déterminer dans le modèle polynomial.

▪ Modèle quadratique

C'est un modèle de degré 2. Sa forme générale est : $Y = a_i X_i + a_{ij} x_i x_j$ ($j > i$).

Dans le cas du mélange ternaire on a :

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3$$

Ce modèle est dicté par un réseau Scheffé (3,2) constitué par six points aux sommets et aux milieux des arrêts du triangle. Pour tester la validité de ce modèle, on a recours à faire quatre essais situés dans les barycentres des sous triangles ainsi formés.

VI.6.3.2. Différents types de mélanges

Les plans de mélanges permettent le choix des mélanges à tester de façon à pouvoir mieux estimer les coefficients a_i , a_{ij} et a_{ijh} . Ce sont des plans optimaux.

Ces plans sont distingués selon les contraintes auxquelles sont soumises leurs différentes composantes X_i :

- **Plan de mélange type I** : dans ce plan, on note qu'il n'y a pas de contrainte particulière.
- **Plan de mélange de type II** : est tel que $X_i \leq l_i$. Ses contraintes sont fréquemment rencontrées. Si aucune contrainte n'est signalée sur une composition, il y a toujours la contrainte naturelle $X_i \geq 0$.
- **Plan de mélange de type III** : est tel que $l_i \leq X_i \leq u_i$. ce sont les plus fréquents et les plus difficiles à utiliser.
- **Plan de mélange type IV** : où X_i ($i=2...k$) $\ll X_1$ où X_1 est le solvant. C'est un cas très particulier de solutions.

VI.7. Outils de calcul

Parmi les outils mathématiques et statistiques utilisés pour l'estimation des coefficients des modèles ainsi que leur test, on trouve la régression linéaire. Pour étudier cet outil on s'intéresse aux modèles linéaires, et on réalise n essais. Si le modèle est polynomial, les résultats de la régression sont applicables en posant : $X_3 = X_1^2$, $X_4 = X_2^2$, $X_5 = X_1 X_2$ [53].

Il est à noter que les différents types de plans d'expériences ainsi que toutes les méthodes et tous les tests, sont informatisés et présentés dans un logiciel « JMP-Minitab-Statistica – Nemrodw – Design-Expert » qu'on a utilisé pour faire le traitement statistique de nos résultats.

VI.8. Présentation de logiciel « Design-Expert »

Pour la construction et l'analyse des plans d'expériences on se dispose de plusieurs supports informatiques telle que le logiciel : JMP-Minitab- Statistica – Nemrodw - Design-Expert

Le logiciel utilisé pour la réalisation de cette étude est le **logiciel Design-Expert 8.0.7.1 version anglaise.**

Le logiciel Design-Expert constitue une aide à la conception de stratégies expérimentales optimales.

Ce logiciel Permet la construction des plans d'expériences et l'analyse des résultats des expériences. Il s'adapte à tous types de problèmes afin de répondre précisément à nos objectifs tout en tenant compte des contraintes expérimentales.

Pour le traitement du plan d'expériences, le logiciel Design-Expert met à notre disposition des outils d'analyse et des indicateurs statistiques spécifiques de l'objectif poursuivi.

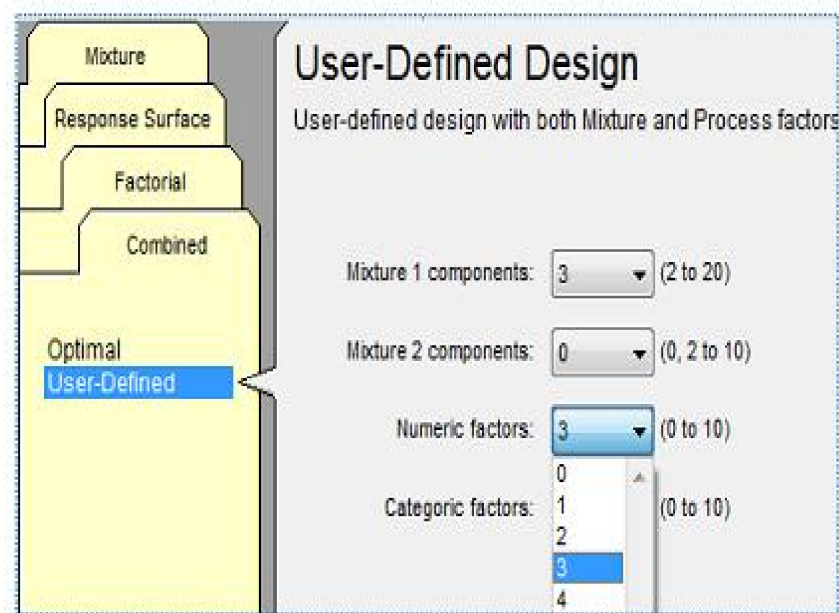
On peut sauvegarder les tableaux et graphiques qui nous intéressent dans un fichier compatible avec la plupart des traitements de texte.

Séquences générales de l'analyse

1.. Ouverture



2. Entrer les données



3. Construction des plans d'expériences

Notes for R2U18ESSAI.dxp

Design (Actual)

Std	Run	Component 1 A:POUZZOL %	Component 2 B:CALCAIRE %	Component 3 C:LAITIER %	Response 1 RC2J Mpa
2	1	0.600	0.200	0.200	22.2
9	2	0.200	0.000	0.800	24.8
18	3	0.200	0.400	0.400	30.9
8	4	0.000	1.00	0.000	28.5
11	5	0.000	0.200	0.800	28.6
5	6	0.600	0.000	0.400	26.2
4	7	0.000	1.00	0.000	26.9
6	8	0.800	0.200	0.000	23.8
1	9	0.000	0.800	0.200	24.2
7	10	0.800	0.000	0.200	19.3
10	11	0.000	0.600	0.400	19.9
3	12	0.400	0.200	0.400	20.8
12	13	1.00	0.000	0.000	19.3
13	14	0.400	0.000	0.600	20.1
14	15	0.400	0.600	0.000	19.4
15	16	0.000	0.000	1.00	19.2
16	17	0.000	0.800	0.000	21.4
17	18	0.333	0.333	0.333	19.2

Design Tool

- Design Layout
- Run Sheet
- Column Info Sheet
- Pop-Out View

For Help, press F1

Page: 2 sur 2 Mots: 184 Français (France)

6. Analyse des résultats d'un plan

Notes for FishPatties.dxp
 Design (Actual x Actual)
 Summary
 Graph Columns
 Evaluation
 Constraints
 Analysis
 R1: Ave Texture
 Optimization
 Numerical
 Graphical
 Point Prediction

Transform | Fit Summary | f(x) | Model | ANOVA | Diagnostics | Model Graphs

Response 1 Ave Texture Transform: None
 *** Mixture Component Coding is L_Pseudo, ***

Mixture Components A B C
 Process Factors D E F

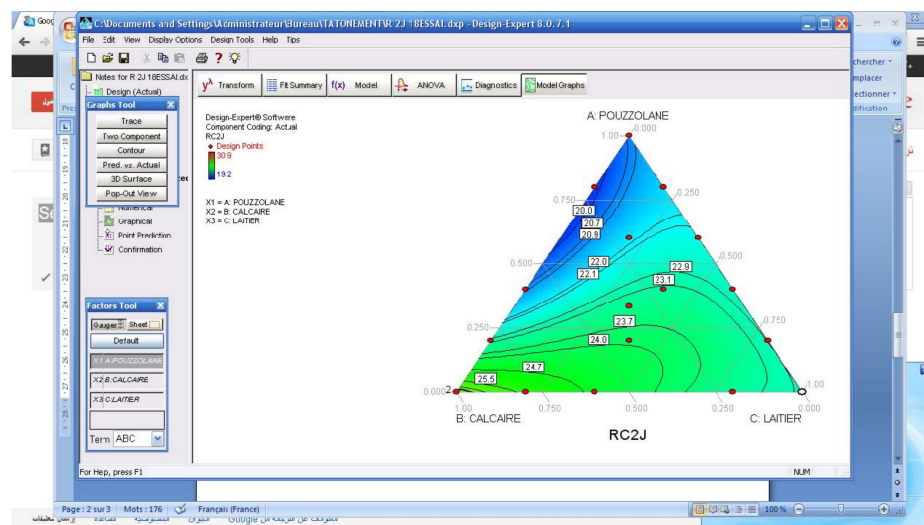
Suggested Model[s]
 Mix Quadratic
 Process Linear

Order Abbreviations in Fit Summary Table
 M = Mean L = Linear Q = Quadratic SC = Special Cubic C = Cubic

Combined Model Mixture Process Fit Summary Table

		Sequential p-value		Summary Statistics	
Mix	Process	Mix	Process	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared
Order	Order				
M	M				
M	L	< 0.0001		0.3918	0.3329
M	2Fi	0.9883		0.3561	0.2507
M	Q	*	*	0.3561	0.2507
M	C	*	* 0.6486	0.3432	0.2198
M	M				
L	M	< 0.0001		0.4460	0.3919
L	L	< 0.0001	< 0.0001	0.9211	0.8889
L	2Fi	< 0.0001	0.6237	0.9177	0.8341
L	Q	* < 0.0001	*	0.9177	0.8341
L	C	* < 0.0001	* 0.9178	0.9113	0.7729
L	M				
Q	M	0.5401		0.4373	0.3487
Q	L	0.0003	< 0.0001	0.9601	0.9240
Q	2Fi	0.0028	0.1129	0.9736	0.8796
Q	Q	* 0.0028	*	0.9736	0.8796

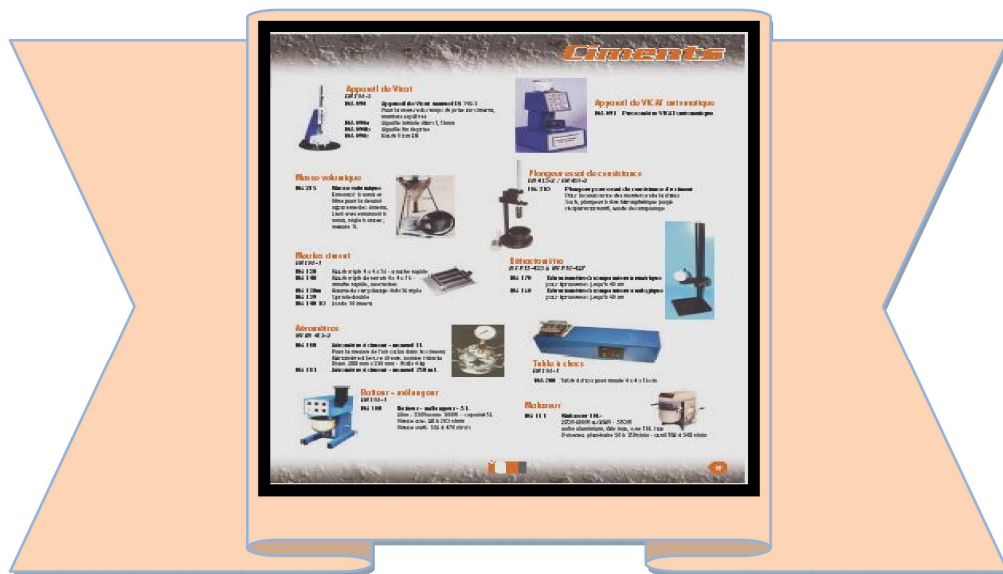
6. graphique



VI.9. Conclusion

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences. Elle amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation.

Deuxième partie étude expérimentale



Préparation des matériaux utilisés

Ce chapitre consiste à présenter d'une façon globale les méthodes de préparation des matériaux utilisés dans notre étude.

- La préparation du ciment ; à savoir la préparation des composants du ciment (clinker ; pouzzolane ; laitier ; calcaire ; gypse)
- Préparation de sable normalisé ; qui concerne la normalisation du sable de oued-Essouf.
- Préparation de milieu agressif.

I.1. La préparation du ciment :

I.1.1. L'extraction des matières première :

Le clinker et les trois ajouts nous été fourni par les ingénieurs du laboratoire de la cimenterie de Ain-kbira.

I.1.2. Le séchage et le broyage :

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées dans des broyeurs à boulets de 5 kg (photo II.2).

- Le séchage s'est effectué dans une étuve à 104°C pendant 24 heures (Photo II.1).



Photo (I.1) : le séchage des ajouts

I.1.3. Le clinker :

Le broyage c'est effectué dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns.

Après le broyage on passe au tamisage pour éliminer les particules supérieures à 80 microns. En suite le clinker a été conditionné dans des sacs en plastique.



Photo (I.2) : broyeur à boulet

I.1.4. Le gypse :

Le dosage du gypse (sulfate de calcium déshydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a été maintenu constant à 5% dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.

I.1.5. Les ajouts :

- Le laitier : Le laitier granulé de haut fourneau, il provient de l'usine métallurgique de la cimenterie d'Ain-kbira et est constitué de deux tiers en masse de la somme de l'oxyde de calcium (CaO), de l'oxyde de magnésium (MgO) et du dioxyde de silicium (SiO_2).
- La pouzzolane : la pouzzolane provient de la de cimenterie d'Ain-kbirac'est une roche sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées.
- Le calcaire : il provient de la carrière de la cimenterie d'Ain-kbira, sa teneur en carbonate de calcium CaCO_3 est supérieure à 75% en masse.
- Broyage des ajouts : les ajouts ont été broyés avec le même procédé et dans les mêmes conditions que le clinker.

III.I.1.6. Préparation des mélanges –Plan d’expérience

III.I.1.6.1. Introduction :

Avant de commencer la préparation des mélanges de ciments, l’établissement d’un plan d’expérience est primordial afin de mieux organiser notre plan d’étude.

Dans cette étude, on a opté pour un ciment quaternaire composé du Clinker broyé gypse et trois ajouts minéraux, la pouzzolane, calcaire et le laitier.

On a choisi dans nos mélanges un pourcentage de 35% pour les trois ajouts pouzzolane, calcaire et le laitier. Par contre le Clinker broyé gypse reste inchangé avec un pourcentage 65%. On se retrouve donc dans le cas d’un plan de mélange
Ce plan de mélange est établi sur la base du logiciel « design expert ».

I.1.6.2. Facteurs :

Les facteurs que l’on veut varier d’une expérience à une autre, et qui nous estimons influence le résultat final (réponse).

Sont trois Facteurs quantitatifs qui représentent trois ajouts minéraux entrant en jeu dans la composition d’un ciment à étudier sont :

facteurs	Nom
A	pouzzolane
B	calcaire
C	laitier

I.1.6.3. Niveau des facteurs :

La délimitation du domaine de variation des facteurs choisis est limitée par un pourcentage de 35% de nos mélanges à étudier.

Minimum	< =	contrainte	< =	Maximum
0	< =	A : pouzzolane	< =	35
0	< =	B : calcaire	< =	35
0	< =	C : laitier	< =	35
		A+B+C	=	35

Contraintes de construction du plan

Composant	Nom	Unité	Type	Minimum	Maximum
A	pouzzolane	%	Melange	0	35
B	calcaire	%	Melange	0	35
C	laitier	%	Melange	0	35
Total = A+B+C = 35.00 %					

I.1.6.4. Réponses :

Les réponses sont les propriétés mécaniques à mesurer pour la variation des facteurs soit :
 Résistance à la compression ou à la flexion d'un mortier à 2 j , 7j , 28j et 60j.

Response	Name	Unité
Y	Rcj	MPa

La résistance à la compression Rcj à :			
2 jours	7 jours	28 jours	60 jours
Rc2	Rc7	Rc28	Rc60
La résistance à la flexion Rfj à :			

I.1.6.5. Matrice des expériences (*Plan de mélange*) :

Composition normalisée pour une unité de 1%				Composition réelle pour 35 % d'ajouts		
N° DE MELAN GE	X1 Pouzzolan e (%)	X2 Calcaire e (%)	X3 Laitier (%)	X1 Pouzzolane (%)	X2 Calcaire (%)	X3 Laitier (%)
1	0,6	0,2	0,2	21	7	7
2	0,2	0	0,8	7	0	28
3	0,2	0,6	0,2	7	21	7
4	0,2	0,4	0,4	7	14	14
5	0	0,4	0,6	0	14	21
6	0,6	0,4	0	21	14	0
7	0	0,2	0,8	0	7	28
8	0,6	0	0,4	21	0	14
9	0	1	0	0	35	0
10	0,4	0,4	0,2	14	14	7
11	0,8	0,2	0	28	7	0
12	0	0,8	0,2	0	28	7
13	0,8	0	0,2	28	0	7
14	0	0,6	0,4	0	21	14
15	0,4	0,2	0,4	14	7	14
16	1	0	0	35	0	0
17	0,4	0	0,6	14	0	21
18	0,4	0,6	0	14	21	0
19	0	0	1	0	0	35
20	0,2	0,2	0,6	7	7	21
21	0,2	0,8	0	7	28	0
22	0,3	0,3	0,3	11,67	11,67	11,67

I.1.6.6. Pesage et étiquetage :

Tout les mélanges (22 mélanges) ont été pesés soigneusement et conditionnés dans des sacs du plastiques de 1kg et étiquetés en fonction des pourcentages de composants.



Photo (I.3) : ciment avant l'agitation



Photo (I.4) : ciment après l'agitation

I.2. Préparation de sable normalisé :

Un sable normalisé, est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie.



Photo (I.5) : sable normalisé.

Chapitre I : préparation des matériaux utilisés étude expérimentale

-Origine du sable normalisé : On a normalisé le sable de oued-Essouf à la norme « EN 196-1 Et : 2014 »

✓ **Oued Essouf :** située au sud-est de l'Algérie, à 620 km au sud-est d'Alger et c'est loin de Bordj Bou Arreridj 463 km sur la route national N48.

-Lieux de préparation : Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed ELBachir Elibrahimi ; Bordj Bou Arreridj.

-Lavage de sable : Le lavage s'effectue par l'utilisation d'une façon abondante et continue de l'eau chaude. Le séchage est effectué à l'air libre.

-Méthode de normalisation du sable :

La normalisation doit être effectuée après lavage et séchage en suivant les étapes ci-dessus :

- ✚ Prélèvement d'une masse de matériau (Sable de Oued Elssouf sec).
- ✚ Constitution de colonne de tamis propres et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimée en mm) [2.0, 1.6, 1.00, 0. 5, 0.16, 0.08].
- ✚ Les fractions ainsi obtenues dans chaque tamis on été conditionnées dans des sacs séparés.

La même méthodologie pour tout le sable.

Les fractions du sable ont été mélangées selon le Tableau (I.1) et conditionnés dans des sacs de 1350 g, qui sert à la préparation du mortier.

Tableau (I.1) : analyse granulométrique du sable normalisé

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés(%)
0.08	99±1
0.16	87±5
0.5	67±5
1.0	33±5
1.6	7±5
2.0	0.0

I.3.Préparation de milieu agressif :

Pour mieux analyser l'effet d'un milieu agressif sur la durabilité des mortiers on a opté pour un milieu agressif constituée d'acide sulfurique avec une concentration de 35% est un composé chimique de formule H_2SO_4 . C'est un acide minéral dont la force est seulement dépassée par quelques supers acides.

- Formule : H_2SO_4
- Densité : 1,84 g/cm
- Masse molaire : 98,079 g/mol
- Point de fusion : 10 °C
- Point d'ébullition : 337 °C
- Nom IUPAC : Sulfuricacid



Photo (I.6) : acide sulfurique

I.4. Eaux utilisé :

L'eau de gâchage utilisé est un eau propre il provient du réseau d'alimentation de l'université.

Pour la conservation des éprouvettes, on a utilisé l'eau distillé.

Méthodes et protocoles d'essais

II.1. Introduction :

Dans le but de mettre en évidence la réponse mécanique et la durabilité d'un mortier à base de ciment quaternaire des essais physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- ✚ Laboratoire physique de la cimenterie d'Ain el kbira .
- ✚ Laboratoire chimique de la cimenterie d'Ain el kbira.
- ✚ Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir EL Ibrahimi; Bordj Bou Arreridj.

Tableau (II.1) : Les essais de caractérisation des matériaux

Matériaux	Essai de caractérisations
Sable	-Equivalent de sable.
Ciment	-La masse volumique. -La surface spécifique.
Clinker	-La masse volumique. - La surface spécifique.
Les ajouts (Calcaire Laitier Pouzzolane)	-La masse volumique. - La surface spécifique.

Tableau (II.2) : Les essais de caractérisation sur mortier durci

Matériau	Essai mécanique
Eprouvette de mortier 16 * 32	Résistance à la flexion et à la compression a 2, 7,28et 60 jour.

II.2. Les essais de caractérisation :

II.2.1. Le sable :

▪ Equivalent de sable (EN 933-8) :

Selon la norme NF-18-598 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage des poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons ou mortier et provoque des gonflements et des retraites.

Mode opératoire :

- ✓ tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g).
- ✓ prendre une pesée de 120g.
- ✓ Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère.
- ✓ A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de chasser les bulles d'air.
- ✓ laisser reposer pendant 10 minutes.
- ✓ fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90cycles de 20cm de course horizontal en 30 secondes à l'aide d'un agitateur mécanique.
- ✓ retirer le bouchon, le rincer avec le solution lavante au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de cette dernière.
- ✓ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps eu tube un léger piquage, cette opération a pour but de laver le sable et de faire montrer les éléments fins et argileux.
- ✓ Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2ème repère, laisser ensuite reposer pendant 20minutes.

Equivalent de sable visuel (E.S.V) :

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.

Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = (h_2 / h_1) \times 100$$

Avec: $h_2 < h_1$

Equivalent de sable piston (E.S.P) :

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$E.S.P = (h'_2 / h_1) \times 100$$

h_1 : La hauteur du sable +floculat

h_2 : La hauteur du sable ($h'_2 < h_1$).

III.II.2.2. Le Ciment :

Les essais de calcul de la masse volumique et la surface spécifique Blaine de ciment c'est les mêmes méthodes calcule de la masse volumique et la surface spécifique Blaine que les ajouts (laitier, calcaire, pouzzolane).

▪ Masse volumique absolue :

Le but :

Détermination de Masse spécifique d'un ciment par le densimètre **LECHATelier**.

Définition :

La masse spécifique peut être un indice de la qualité du liant, en générale, sa valeur permet de déceler l'introduction des adjuvants ou des produit ou liants, la masse spécifique est la masse d'un liant par unité de volume de matière plein, examiné dans les conditions d'ambiance.

Matériel nécessaire :

- Un volumétre Le Chatelier
- Un liquide inerte vis-à-vis du ciment (alcool brûler de préférence, à défaut eau).
- Une balance.
- Un entonnoir à long col.
- Une tige métallique.
- Une spatule.

Mode opératoire :

- On pèse 64g du ciment
- On introduit cette quantité dans le densimètre LECHATELIER déjà rempli en benzène.
- On introduit le densimètre dans un bain thermostatique à une température de $(20 \pm 1^\circ)$
- Lorsque le niveau de benzène devient stable on note le volume déplacé V.

On calcule la masse spécifique avec la formule suivante :

$$\rho_c = M/V \quad (kg/l)$$

Ou M : masse de ciment dans le densimètre.

▪ **La surface spécifique Blaine (SSB) norme (NF-P 15 442) :**

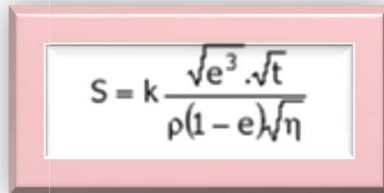
La SSB et la surface totale en cm^2 développée par 1g de liant, elle est mesurée conventionnellement selon la norme NF-P 15 442.

Matériel Utilise :

Un appareil appelé « Perméabilimètre de **Blaine** ». Il se compose pour l'essentiel de :

- ✓ **Cellule** : dans laquelle est placé le ciment à tester.
- ✓ **Manomètre** : constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère ou mercure.
- ✓ **La cellule** est équipée d'une grille en sa partie inférieure.
- ✓ **une grille** : est plane et perforé de 30a40trous de 1mm de diamètre
- ✓ **Un piston** : sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.
- ✓ **Une balance** : précise à 0,001 g.

- ✓ **Un chronomètre** : précis à 0,2 s près.
- ✓ **Des rondelles de papier filtrent** : adaptées au diamètre de la cellule.
- ✓ mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
- ✓ Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air.



$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

Mode opératoire :

- Placer grille + papier filtre + ciment (quantité calculée) + papier filtre.
- Tasser et ôter le piston.
- Vérifier le niveau du liquide : il doit arriver au trait inférieur (4); si nécessaire, parfaire ce niveau.
- Placer la cellule sur l'ajutage. La jonction doit être étanche (très mince couche de vaseline).
- s'assurer de l'étanchéité de l'ensemble (boucher la cellule avec le pouce, aspirer avec la poire pour faire monter le liquide aux environs du trait supérieur (1), si on ferme le robinet, le niveau doit rester constant).
- L'étanchéité tant réalisée, aspirer le liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le trait supérieur (1), et fermer le robinet.
- L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse : chronométrer le temps que met le liquide à passer du 2^e trait au 3^e trait; soit t (en secondes) la moyenne des temps résultant des 3^e mesures consécutives.

La surface spécifique est calculée par la formule :

- t : Temps mesuré en secondes.
- k : Constante de l'appareil.
- ρ : Masse spécifique (g/cm³).
- E : Porosité de la couche tassée, égale 0.500.
- η : Viscosité de l'air à la température air=20°C.
- S : Surface spécifique (cm²/g)

II.3. Formulation des mortiers :

Nous utiliserons des mortiers normaux, selon la norme NFP 15-403 dont la composition est la suivante :

- 450g de liant, les ajouts étant toujours introduits en substitution du ciment.
- 1350g de sable normalisé.

Le taux de l'eau de gâchage a été maintenu constant pour l'ensemble des gâchées : $E/C = 0.5$.

Le mortier normal est réalisé à l'aide d'un malaxeur **MATEST** dans une cuve de cinq litres répandant aux caractéristiques de la norme NF P 15-411.

Nous avons élaboré les séries d'éprouvettes suivantes :

- 40x40x160 mm³ destinées pour les essais mécaniques.
- 40x40x160 mm³ destinées pour les essais de la résistivité à l'attaque acide.

II.3.1. Confection des éprouvettes :

Les échantillons d'essais ont été confectionnés conformément à la Norme ENV 197-1. Dans des moules prismatiques 40x40x160 mm³ et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc. Une fois arasés, les moules contenant les échantillons sont couverts de film en plastique et stockés dans l'environnement de laboratoire. Le démoulage est effectué après une durée de 24h et les échantillons sont conservés au laboratoire dans une eau distillée jusqu'au jour de teste (photo II.1).



Photo (II.1): Mode de conservation des éprouvettes.

Il est à noter que les essais mécaniques ont été effectués aux échéances de : 2 - 7 - 28 et 60 jours.

II.4. Les Essais mécaniques :

II.4.1. Résistance à la flexion :

La mesure de la résistance à la flexion a été effectuée à l'aide d'un appareil **MATEST** pourvu d'un dispositif de flexion trois points (Figure II.2).

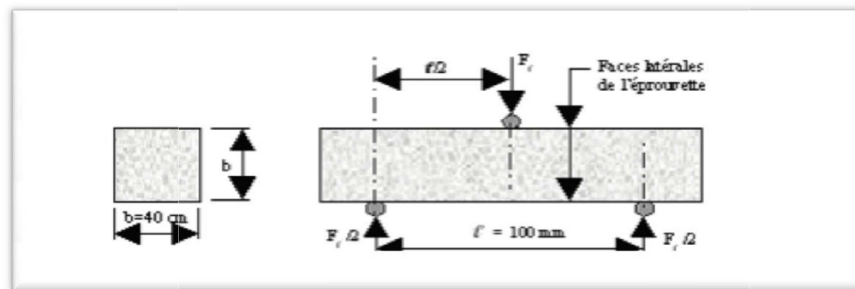


Figure (II.2) : schéma de flexion de trois points

II.4.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les demi-primes issues de la flexion trois-points. Le demi-prisme est centré entre les deux plateaux de l'appareil **MATEST** et un chargement est effectué à une vitesse constante de 0.05 Mpa/s jusqu'à la rupture. On effectue la lecture de la charge d'écrasement P en Mpa et la résistance l'appareil.

Les essais sont effectués conformément à la Norme NF P 15-471.

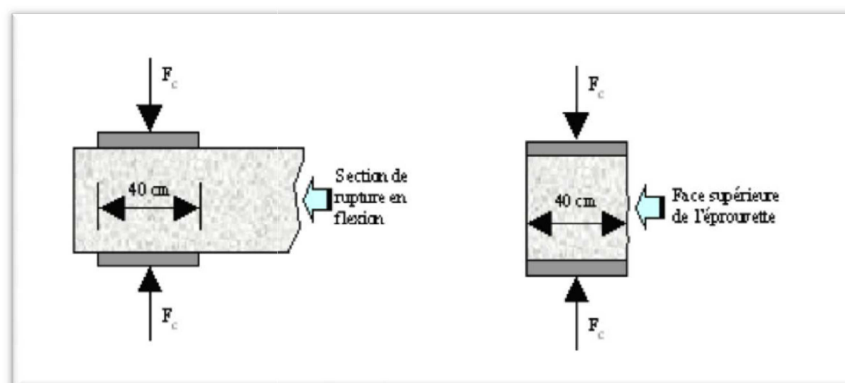


Figure (II.3) : schéma de l'essai de compression

II.5. Essai de durabilité - Attaque des mortiers par l'acide sulfurique :**▪ Procédure de l'essai :**

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes de mortier 40 x 40 x 160 mm³ ont été confectionnées selon la Norme ENV 197-1. Démoulées à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau robinet (l'eau de laboratoire) à 20° ± 2°C jusqu'à 28 jours. Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans la solution de 3,5 % de l'acide sulfurique.



Photo (II.4): Eprouvettes de mortiers immergés dans la solution acide

- Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

Avec : M_1 : masse des éprouvettes avant immersion.

M_2 : masse des éprouvettes après immersion.

II.6. Conclusion :

Les essais physiques, mécanique, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et durabilité.

Caractérisation des matériaux utilisés

III .1.Caractérisation du sable :

III.1.1.Equivalent de sable avant la normalisation :

Tableau (III.1) : Equivalent de sable d'Oued Essouf

Essai	H1	H2	H'2	E.S.V (%)	E.S.P (%)
1	10,4	9	8,3	86,53	81,80
2	10,2	9	8,4	88,23	82,35
3	10,2	8,8	8,3	86,27	81,37

Après la comparaison aux résultats proposés par G-DREUX :

E.S.V > 85 %

E.S. P > 80 % donc : le sable de Oued Essouf est très propres.

III.1.2.Analyse granulométrique du sable normalisé :

Le sable normalisé est conditionné en sac plastique en dose de $1350 \pm 5g$ et sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur de fuseau indiqué dans la (Figure III.1) :

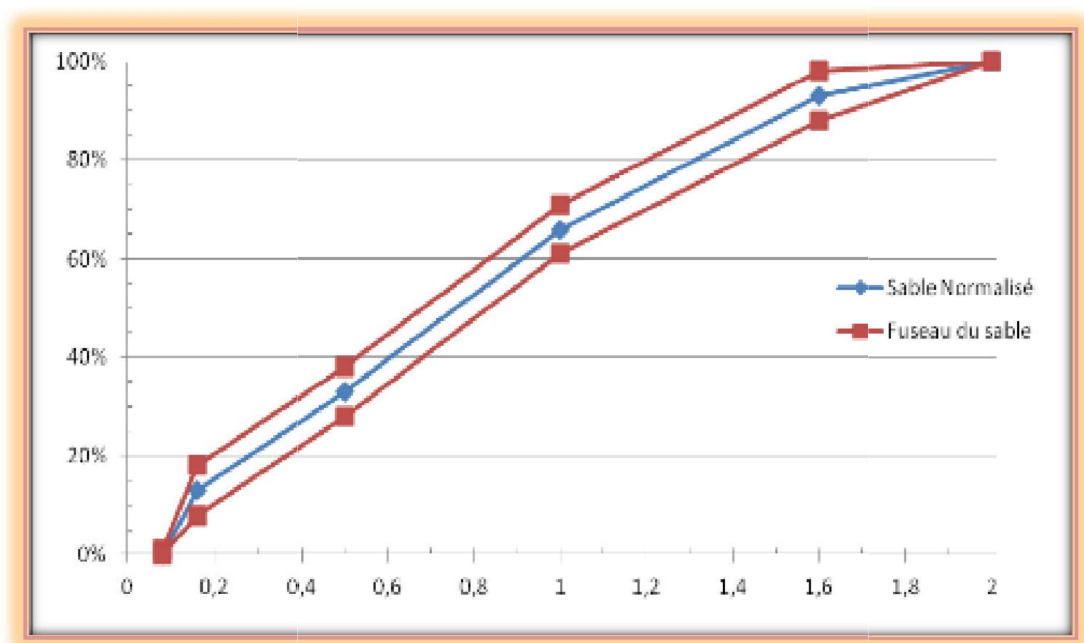


Figure (III.1) : Courbe granulométrique du sable normalisé

III.2.Caractérisation des ciments fabriqués et leurs composants :**III.2.1. Caractérisation des composants cimentaires :**

- Les essais physiques :

Tableau (III.2) : la masse volumique et SSB des composants

Les composants	La masse volumique (g /ml)	SSb (cm ² /g)
Gypse	2,68	7984
Clinker	3,10	3306
Calcaire	2,23	3575
Laitier	2,72	3444
Pouzzolane	2,38	3315

- L'analyse chimique :

Les compositions chimiques de clinker et ajouts :

Tableau (III.3) : Les compositions chimiques de clinker et ajouts

Les composants	SiO ₂	AL ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	CL	PaF
Clinker	21,38	4,25	65,55	5,32	1,72	0,58	0,353	0,005	0,85
Calcaire	10,14	1,26	48,09	0,65	0,85	0,27	0,188	0,012	38,530
Laitier	32,15	6,11	29,01	2,24	4,78	1,03	0,616	0,017	24,045
Pouzzolane	37,80	16,85	15,41	13,10	3,31	0,13	2,099	0,023	11,297

III.2.2. Caractérisation des mélanges du ciment :

- La Surface spécifique Blaine et la masse volumique de chaque type de ciment :

Tableau (III.4) :La Surface spécifique Blaine et la masse volumique de chaque type de ciment

Type de ciment	La masse volumique (g /ml)	SSb(cm ²)
1	2,706	3336,38
2	2,651	3381,95
3	2,754	3381,81
4	2,709	3163,61
5	2,675	3354,44
6	2,741	3327,21
7	2,675	3390,98
8	2,672	3345,55
9	2,812	3354,30
10	2,730	3345,41
11	2,717	3318,18
12	2,778	3363,47
13	2,682	3327,35
14	2,743	3372,64
15	2,696	3354,58
16	2,693	3309,15
17	2,661	3363,75
18	2,764	3336,24
19	2,640	3400,15
20	2,685	3372,78
21	2,788	3348,35
22	2,715	3354,87

III.3. L'eau de gâchage :

Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus concernant les analyses physico chimiques.

Tableau (III.5): Analyses physico-chimiques de l'eau de gâchage [51].

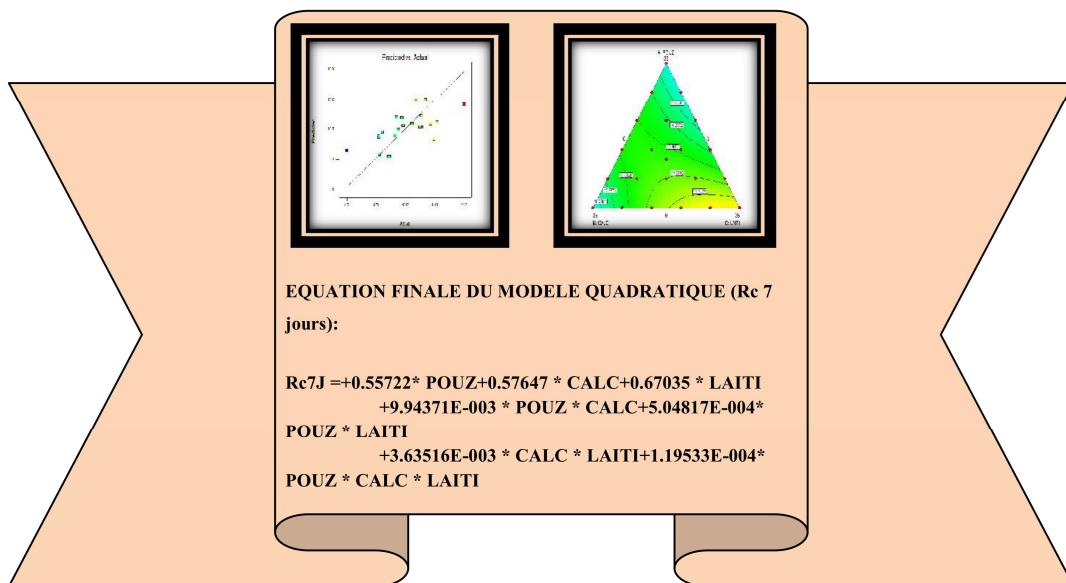
Paramètres physiques	Méthodes utilisés	Résultat	Normes
PH	pH mètre	8.18	6,5-8,5
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	Conductimètre	1250	2800
Turbidité NTU	Turbidimètre	1.44	
Température °C		25	20 – 30
Chlore total mg/L	Photo-Flex	0.24	0,05-0,5
Parametres De pollutions	Méthodesutilizes	Résultats	Normes
			Concentration max
Nitrites (NO_2^-) mg/l	Photo-Flex	< 0,15	= 0,1
			Concentration max
Nitrates (NO_3^-) mg/l	Photo-Flex	< 1,8	= 50
phosphates mg/l	Photo-Flex	< 0,5	0,5-25,00
Minimalisationglobale	Méthodesutilisés	Résultats	Normes
Magnesium mg/l	Photo-Flex	35	5-215
Sulfate mg/l	Photo-Flex	151	25-250
Dureté TH °F	Photo-Flex	23,5	15-50

III.4. Conclusion :

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

troisième partie résultats et interprétations

troisième partie résultats et interprétations



Les résultats obtenus

I.1. Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnées selon les ciments avec ajouts (Pouzzolane , Calcaire et laitier) suivant le plan de mélange étudié.

Ces résultats portent sur les caractéristiques physiques et mécaniques tel que la résistance mécanique (compression et flexion) aux échéances 2 - 7- 28et 60jours, sur la résistance de ces mortiers à l'attaque acide sulfurique (H_2SO_4) ainsi que les essais d'absorption.

I.2. Les résultats mécaniques :

Compression :

Tableau (I.1):La résistance mécanique à la compression.

Type de ciment	Résistance a la compression (MPa)			
	2j	7j	28j	60j
1	9,797	20 ,382	34,507	36,358
2	11,682	24,230	37,813	46,642
3	11,466	22,872	35,076	34,079
4	10,551	23,540	36,800	43 ,871
5	12,549	24,330	34,952	41,490
6	11,184	23,788	34,127	38,493
7	11,298	23,395	37,822	43,979
8	8,794	20,643	36,329	41,036
9	9,831	20,316	28,065	29,988
10	10,592	22,846	35,109	39,298
11	9,822	20,914	30,907	36,227
12	9,930	20,544	31,034	39,56
13	10,119	21,019	33,576	37,362
14	11,178	21,588	33,494	33,258
15	10,437	21,826	34,920	43,577
16	10,157	20,119	31,680	35,885
17	11,580	21,682	35,272	39,440
18	11,131	21,902	29,886	33,099
19	11,008	22,288	39,484	44,784
20	10,373	24,200	36,180	42,464
21	10,325	23,192	26,566	30,823
22	10,879	24,543	35,548	39,573

 Traction :
Tableau (II.2):La résistance mécanique à la traction.

Type de ciment	Résistance a la traction (MPa)			
	2j	7j	28j	60j
1	3,758	5,135	6,016	6,337
2	3,197	5,410	6,061	6,520
3	3,295	4,813	5,717	6,372
4	3,213	5,395	5,580	6,267
5	3,574	5,166	6,121	7,811
6	3,044	4,829	5,338	7,433
7	3,371	5,297	6,477	7,319
8	2,673	4,768	6,730	6,980
9	3,057	4,734	6,021	5,412
10	3,341	5,039	6,777	6,530
11	2,878	4,467	6,452	5,409
12	3,208	5,000	6,681	6,735
13	2,891	4,923	6,690	5,161
14	3,466	5,241	6,971	5,880
15	3,028	5,041	6,834	7,207
16	2,987	4,296	6,663	5,541
17	3,289	4,794	5,897	6,007
18	3,141	4,598	5,686	5,006
19	3,371	5,409	6,934	6,818
20	3,244	4,985	6,829	6,286
21	3,371	4,957	5,218	5,864
22	3,466	5,018	6,163	5,373

 La chute de résistance :

Tableau (II.3): La chute de la résistance.

ciment	R ₁	R ₂	La chute (%)
1	34,507	14,560	57.806
2	37,813	17,339	54.145
3	35,076	14,403	58.938
4	36,800	23,805	35.312
5	34,952	15,804	54.784
6	34,127	16,130	52.735
7	37,822	23,125	38.858
8	36,329	23,987	34
9	28,065	16,577	40.933
10	35,109	23,019	34.418
11	30,907	23,311	24.577
12	31,034	17,081	44.96
13	33,576	18,628	44.52
14	33,494	21,335	36.302
15	34,920	21,478	38.494
16	31,680	23,231	26.67
17	35,272	20,713	41.276
18	29,886	28,041	6.173
19	39,484	21,144	46.449
20	36,180	25,954	25.899
21	26,566	23,991	9.693
22	35,548	26,084	26.623

**L'absorption :****Tableau (II.4): L'absorption (%)**

Ciment	M ₁	M ₂	L'absorption (%)
1	573	520	9,249
2	573	525	8,377
3	566	515	9,011
4	582	532	8,591
5	569	519	8,787
6	569	523	8,084
7	580	528	8,965
8	571	520	8,932
9	569	519	8,787
10	564	518	8,156
11	550	503	8,545
12	569	518	8,963
13	572	523	8,566
14	558	509	8,781
15	566	516	8,834
16	555	507	8,649
17	561	511	8,913
18	566	518	8,480
19	573	523	8,726
20	566	516	8,834
21	564	517	8,333
22	562	516	8,185

**La perte de masse :****Tableau (II.4):** La perte de masse (%)

Ciment	M ₁	M ₂	La perte (%)
1	575	555	3,478
2	571	550	3,678
3	572	557	2,622
4	581	575	1,033
5	571	539	5,604
6	568	554	2,465
7	577	564	2,253
8	563	547	2,842
9	577	568	1,560
10	568	551	2,993
11	559	556	0,537
12	570	554	2,807
13	573	566	1,222
14	564	547	3,014
15	570	558	2,105
16	566	564	0,353
17	566	538	4,947
18	572	564	1,399
19	583	562	3,602
20	566	559	1,237
21	569	557	2,109
22	567	563	0,705

Modélisation et interprétation des résultats

Le chapitre suivant est destiné à la modélisation des différents résultats. Cette modélisation est obtenue en utilisant le logiciel Design Expert.

Des représentations graphiques simples sont aussi présentées, expliquées et interprétées de façon à déduire l'influence de chaque ajout introduit dans la formulation des ciments préparé sur les propriétés physique et mécanique des mortiers confectionnée.

II.1. Analyse et commentaire des résultats (résistances à la compression) :

II.1.1. La résistance à la compression à 2jour :

Tableau (II.1): résistance à la compression à 2jours.

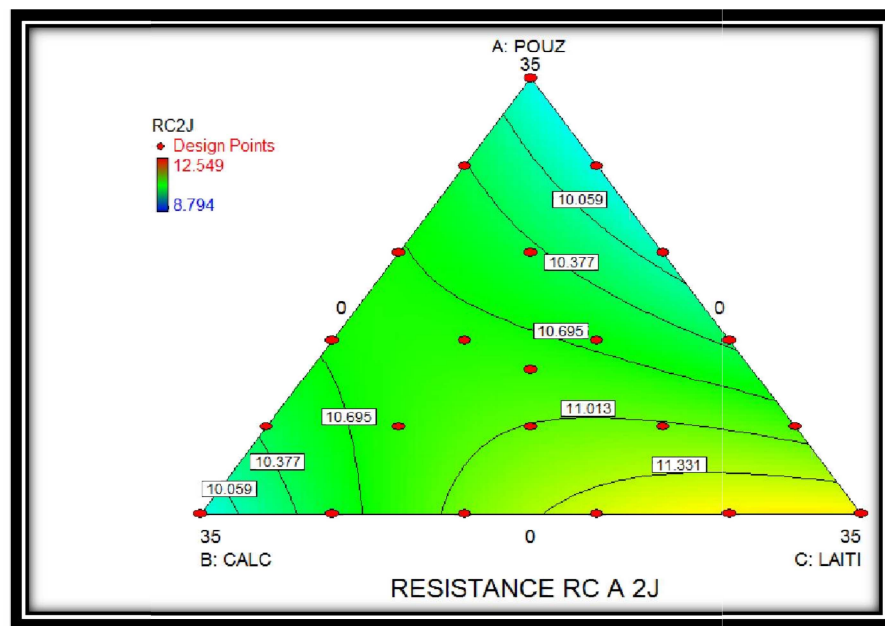
Facteurs	x ₁	x ₂	x ₃	Résistance à 2j	
(type d'ajout)	pouzzolane	calcaire	laitier	Σ des ajouts	Rc 2j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	9,797
2	7	0	28	35	11,682
3	7	21	7	35	11,466
4	7	14	14	35	10,551
5	0	14	21	35	12,549
6	21	14	0	35	11,184
7	0	7	28	35	11,298
8	21	0	14	35	8,794
9	0	35	0	35	9,831
10	14	14	7	35	10,592
11	28	7	0	35	9,822
12	0	28	7	35	9,930
13	28	0	7	35	10,119
14	0	21	14	35	11,178
15	14	7	14	35	10,437
16	35	0	0	35	10,157
17	14	0	21	35	11,580
18	14	21	0	35	11,131
19	0	0	35	35	11,008
20	7	7	21	35	10,373
21	7	28	0	35	10,325
22	11,67	11,67	11,67	35	10,879

EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE (Rc 2jors) :

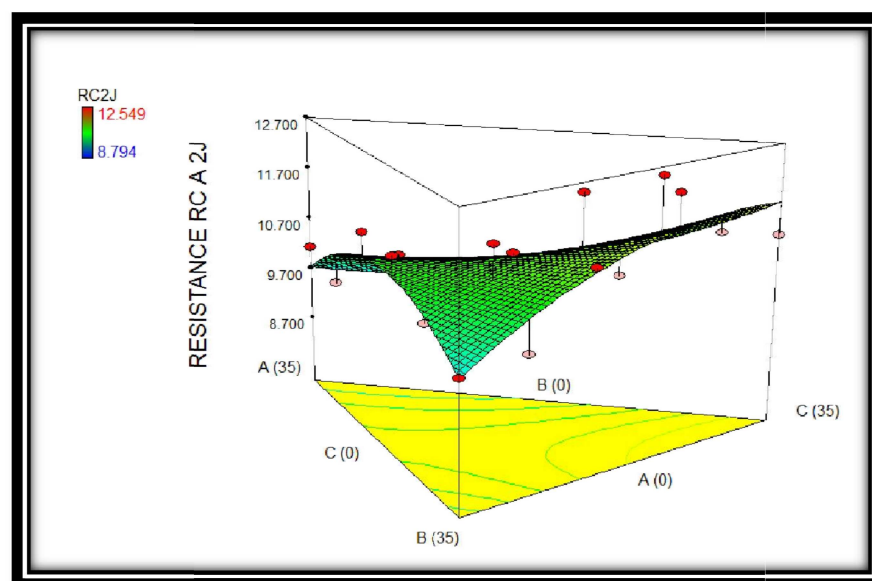
$$R_{c2} = +9.76389 * \text{pouz} + 9.82723 * \text{calc} + 11.62175 * \text{laiti}$$

$$+ 3.84883 * \text{pouz} * \text{calc} - 2.31739 * \text{pouz} * \text{laiti} + 2.29927 * \text{calc} * \text{laiti}$$

- Modélisation de la résistance à la compression à 2 jours (Rc2j) :



Figure(II.1) : diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 2 jours.



Figure(II.2) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 2 jours

D'après nos résultats présentés sous forme d'un diagramme triangulaire, on remarque que la réponse mécanique à la compression à 2 jours est importante pour les mélanges qui contiennent plus de laitier ciment binaire ou ternaire avec calcaire (couleur jauneâtre) par rapport aux autres ciments ternaire (laitier, pouzzolane) et binaire (calcaire).

II.1.2. La résistance à la compression à 7j :

Tableau (II.2): Résistance à la compression à 7j

	x ₁	x ₂	x ₃		Résistance à 7j
	pouzzolane	calcaire	laitier	% des ajouts	Rc 7j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	20,382
2	7	0	28	35	24,230
3	7	21	7	35	22,872
4	7	14	14	35	23,540
5	0	14	21	35	24,330
6	21	14	0	35	23,788
7	0	7	28	35	23,395
8	21	0	14	35	20,643
9	0	35	0	35	20,316
10	14	14	7	35	22,846
11	28	7	0	35	20,914
12	0	28	7	35	20,544
13	28	0	7	35	21,019
14	0	21	14	35	21,588
15	14	7	14	35	21,826
16	35	0	0	35	20,119
17	14	0	21	35	21,682
18	14	21	0	35	21,902
19	0	0	35	35	22,288
20	7	7	21	35	24,200
21	7	28	0	35	23,192
22	11,67	11,67	11,67	35	24,543

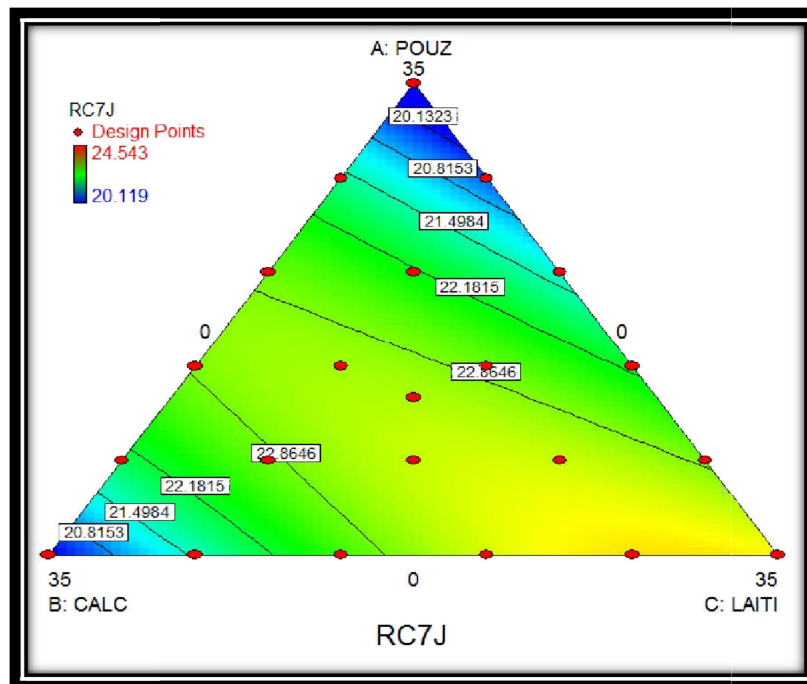
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE(Rc7 jours):

$$Rc7J = +0.55722 * POUZ + 0.57647 * CALC + 0.67035 * LAITI$$

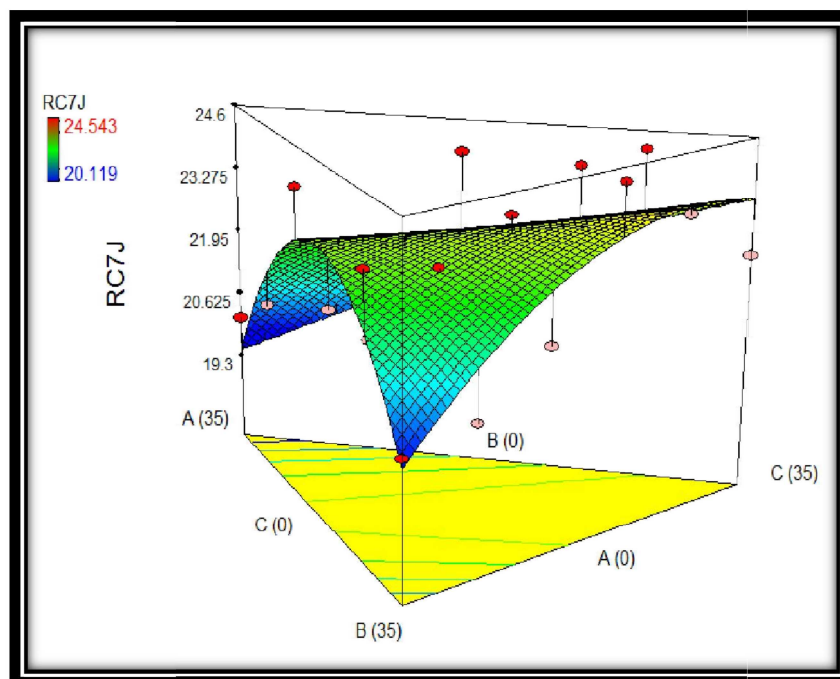
$$+ 9.94371E-003 * POUZ * CALC + 5.04817E-004 * POUZ * LAITI$$

$$+ 3.63516E-003 * CALC * LAITI + 1.19533E-004 * POUZ * CALC * LAITI$$

- Modélisation de la résistance à la compression à 7 jours (Rc7j) :



Figure(II.3) : diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 7 jours.



Figure(II.4) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 7 jours

A 7 jours l'évolution des résistances mécanique a la compression reste toujours meilleure, pour le ciment binaire avec laitier (couleur vert âtre), pour les ciments quaternaire avec des

proportion d'ajouts égale (couleur vert) et faible pour les ciments binaire avec calcaire ou pouzzolane(couleur bleu).

II.1.3.La résistance à la compression à 28j et 60j :

Tableau (II.3):Résistance à la compression à 28j

	X ₁	X ₂	X ₃		Résistance à 28j
	pouzzolane	Calcaire	laitier	des ajouts	Rc 28j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	34,507
2	7	0	28	35	37,813
3	7	21	7	35	35,076
4	7	14	14	35	36,800
5	0	14	21	35	34,952
6	21	14	0	35	34,127
7	0	7	28	35	37,822
8	21	0	14	35	36,329
9	0	35	0	35	28,065
10	14	14	7	35	35,109
11	28	7	0	35	30,907
12	0	28	7	35	31,034
13	28	0	7	35	33,576
14	0	21	14	35	33,494
15	14	7	14	35	34,920
16	35	0	0	35	31,680
17	14	0	21	35	35,272
18	14	21	0	35	29,886
19	0	0	35	35	39,484
20	7	7	21	35	36,180
21	7	28	0	35	26,566
22	11,67	11,67	11,67	35	35,548

EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE(Rc28 jours) :

$$\begin{aligned}
 Rc28J = & +0.90103 * POUZ + 0.76653 * CALC + 1.09865 * LAITI \\
 & + 8.61668E-003 * POUZ * CALC + 3.66588E-003 * POUZ * LAITI \\
 & + 8.86996E-003 * CALC * LAITI
 \end{aligned}$$

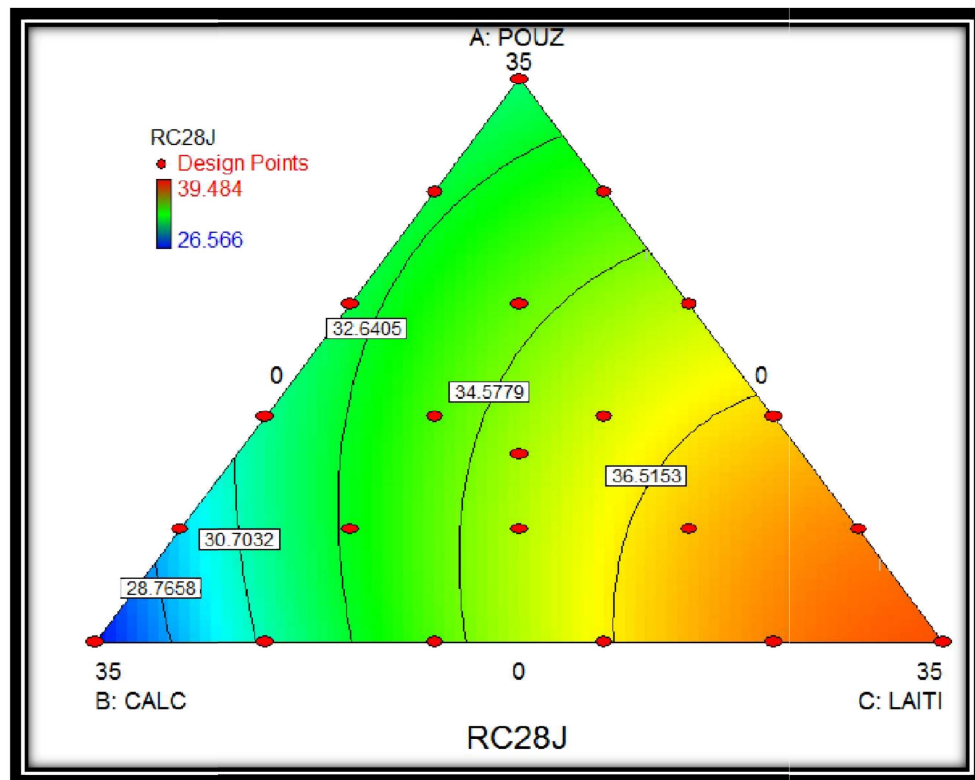
Tableau (II.4):Résistance à la compression à 60j

	X ₁	X ₂	X ₃	Résistance à 60j	
	pouzzolane	calcaire	laitier	Σ des ajouts	Rc 60j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	36,358
2	7	0	28	35	46,642
3	7	21	7	35	34,079
4	7	14	14	35	43 ,871
5	0	14	21	35	41,490
6	21	14	0	35	38,493
7	0	7	28	35	43,979
8	21	0	14	35	41,036
9	0	35	0	35	29,988
10	14	14	7	35	39,298
11	28	7	0	35	36,227
12	0	28	7	35	39,56
13	28	0	7	35	37,362
14	0	21	14	35	33,258
15	14	7	14	35	43,577
16	35	0	0	35	35,885
17	14	0	21	35	39,440
18	14	21	0	35	33,099
19	0	0	35	35	44,784
20	7	7	21	35	42,464
21	7	28	0	35	30,823
22	11,67	11,67	11,67	35	39,573

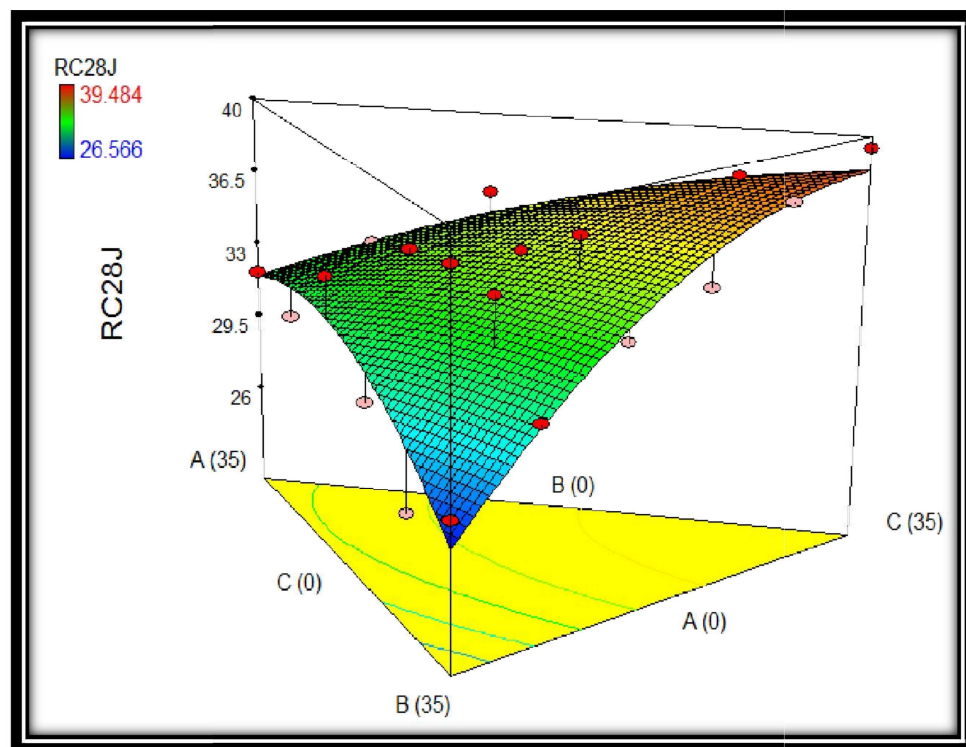
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE(Rc 60 jours) :

$$\begin{aligned}
 \text{Rc60J} = & +1.01571 * \text{POUZ} + 0.85121 * \text{CALC} + 1.29956 * \text{LAITI} \\
 & + 8.97676\text{E-}003 * \text{POUZ} * \text{CALC} + 3.63711\text{E-}003 * \text{POUZ} * \text{LAITI} \\
 & + 7.74450\text{E-}003 * \text{CALC} * \text{LAITI}
 \end{aligned}$$

- **Modélisation de la résistance à la compression à 28 jours (Rc28j) :**

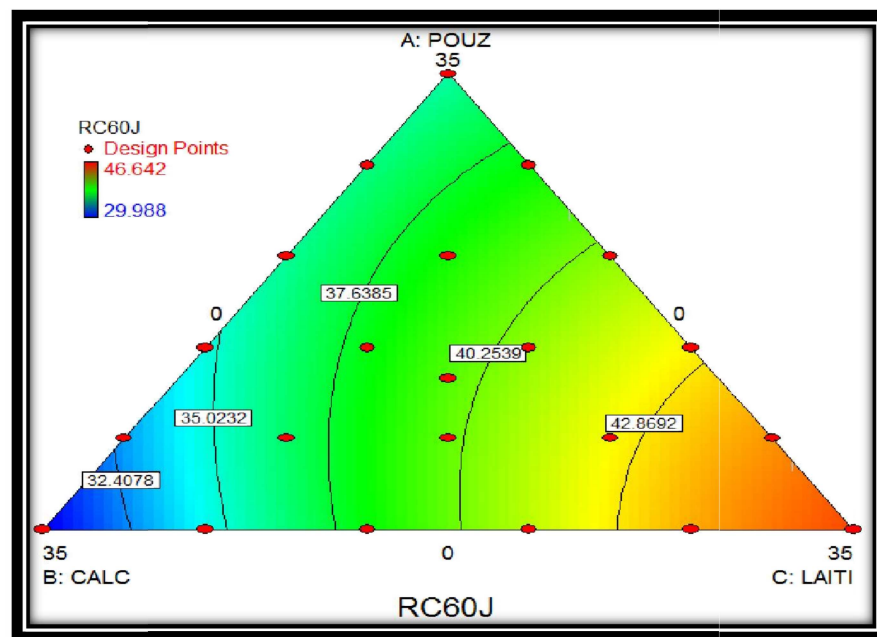


Figure(II.5) : diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 28 jours.

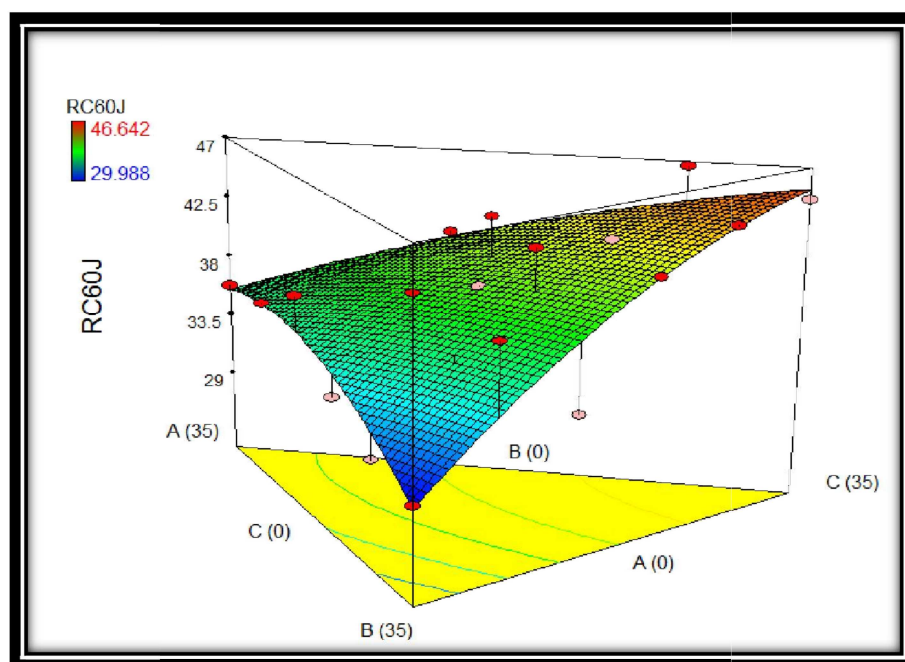


Figure(II.6) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 28 jours

- **Modélisation de la résistance à la compression à 60 jours (Rc60j) :**



Figure(II.7) : diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 60 jours.



Figure(II.8) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 60 jours

Contrairement aux résultats mentionner auparavant qui montre l'évolution de la réponse mécanique aux jeunes âges (2 et 7 jours), dans le moyen terme et à long terme (28 et 60 jours) l'action de la pouzzolane et le laitier sur la résistance de compression des mortiers s'avère plus efficace que l'action du calcaire cela est due à l'activité pouzzolanique qui fixe la portlandite Ca(OH)_2 libérée par l'hydratation du ciment pour donner naissance au silicate de calcium hydraté

C-S-H.

Donc la relation entre le taux des ajouts actif et la résistance mécanique a la compression est linéaire, Plus on augmente le pourcentage des ajouts actifs plus la résistance augmente, et on diminuant ce taux la résistance diminue.

Il est très important de signaler que l'association de trois ajouts à la fois donne des résultats satisfaisants tout en majoraient le taux des ajouts actif.

II.2.Analyse et commentaire des résultats à la traction par flexion :

Le modèle choisi pour représenter la variation de la résistance à la traction par flexion à 2, 7,28et 60jours ($R_f 2j$, $R_f 7j$, $R_f 28j$ et $R_f 60j$) en fonction des constituants du ciment est toujours le modèle quadratique.

II.2.1.La résistance à la traction par flexion à 2jour :

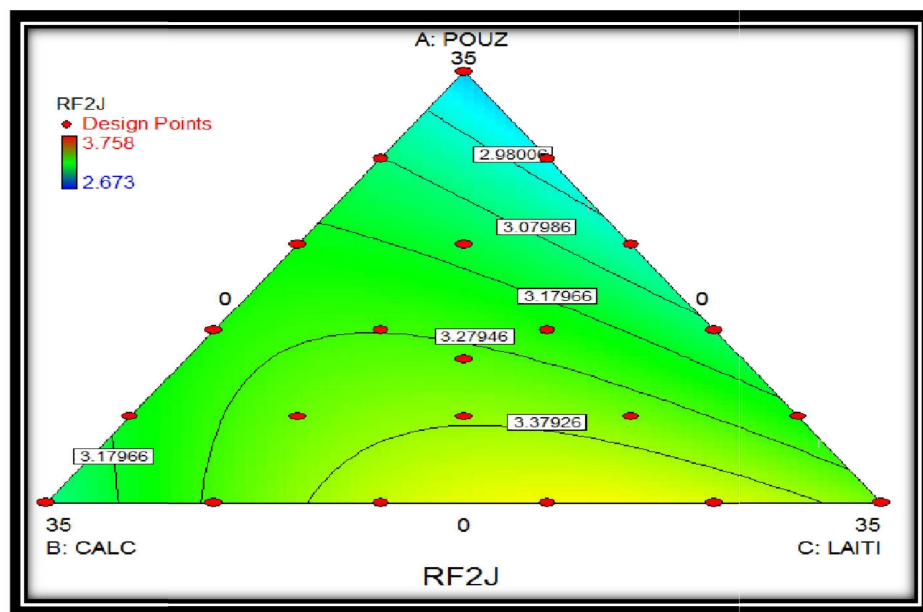
Tableau (II.5):Résistance à la traction par flexion à 2j

	x_1	x_2	x_3		Résistance à 2j
	pouzzolane	Calcaire	laitier	% des ajouts	$R_t 2j$
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	3,758
2	7	0	28	35	3,197
3	7	21	7	35	3,295
4	7	14	14	35	3,213
5	0	14	21	35	3,574
6	21	14	0	35	3,044
7	0	7	28	35	3,371
8	21	0	14	35	2,673
9	0	35	0	35	3,057
10	14	14	7	35	3,341
11	28	7	0	35	2,878
12	0	28	7	35	3,208
13	28	0	7	35	2,891
14	0	21	14	35	3,466
15	14	7	14	35	3,028
16	35	0	0	35	2,987
17	14	0	21	35	3,289
18	14	21	0	35	3,141
19	0	0	35	35	3,371
20	7	7	21	35	3,244
21	7	28	0	35	3,371
22	11,67	11,67	11,67	35	3,466

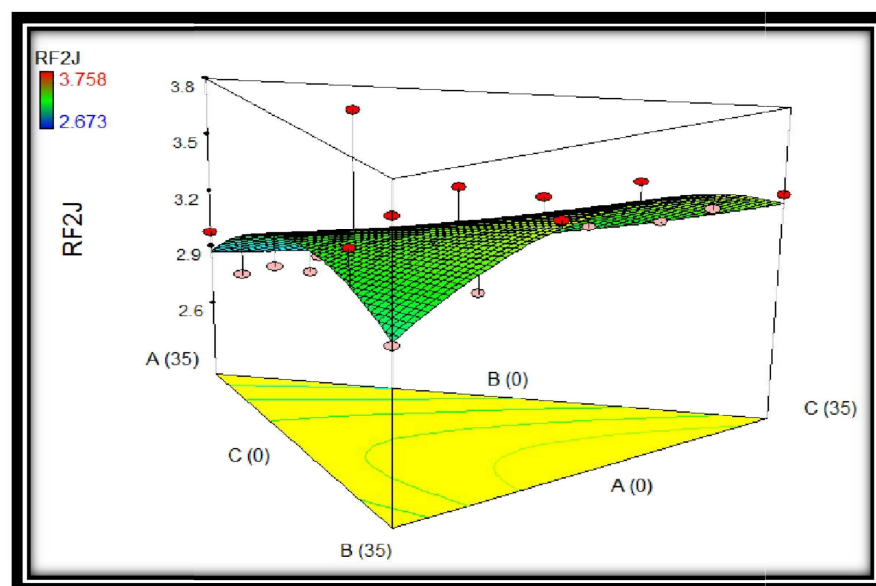
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE (Rt 2 jours):

$$\begin{aligned}
 \text{Rt2J} = & +0.082293 * \text{POUZ} + 0.087864 * \text{CALC} + 0.095096 * \text{LAITI} \\
 & + 8.28673\text{E-}004 * \text{POUZ} * \text{CALC} - 1.81653\text{E-}004 * \text{POUZ} * \text{LAITI} \\
 & + 8.55519\text{E-}004 * \text{CALC} * \text{LAITI}
 \end{aligned}$$

- Modélisation de la résistance à la traction par flexion à 2 jours (Rc2j) :



Figure(II.9) : diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 2 jours.



Figure(II.10) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 2 jours

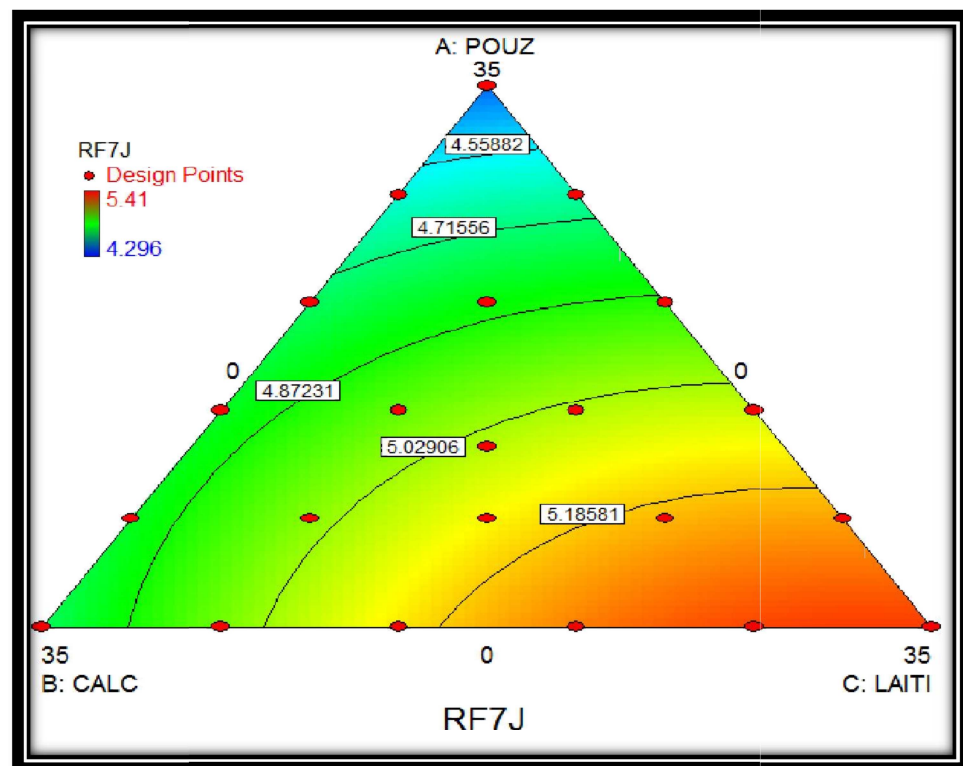
II.2.2.La résistance à la traction par flexion à 7jour :**Tableau (II.6):Résistance à la traction par flexion à 7j**

	X ₁	X ₂	X ₃		Résistance a 7j
	pouzzolane	Calcaire	laitier	⊞ des ajouts	Rt 7j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	5,135
2	7	0	28	35	5,410
3	7	21	7	35	4,813
4	7	14	14	35	5,395
5	0	14	21	35	5,166
6	21	14	0	35	4,829
7	0	7	28	35	5,297
8	21	0	14	35	4,768
9	0	35	0	35	4,734
10	14	14	7	35	5,039
11	28	7	0	35	4,467
12	0	28	7	35	5,000
13	28	0	7	35	4,923
14	0	21	14	35	5,241
15	14	7	14	35	5,041
16	35	0	0	35	4,296
17	14	0	21	35	4,794
18	14	21	0	35	4,598
19	0	0	35	35	5,409
20	7	7	21	35	4,985
21	7	28	0	35	4,957
22	11,67	11,67	11,67	35	5,018

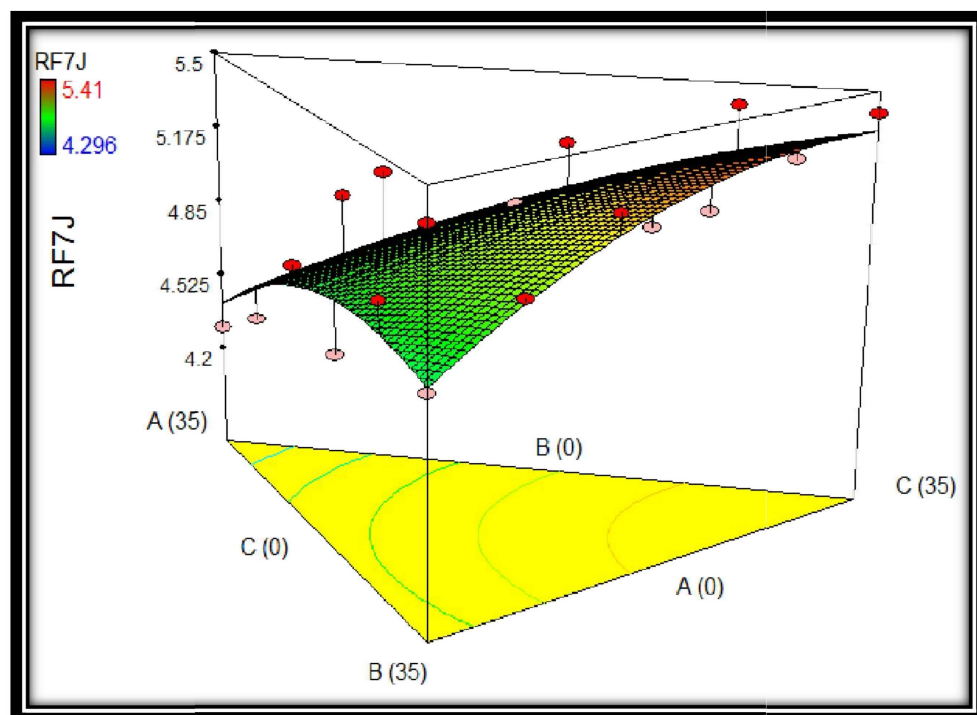
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE(Rt 7 jours) :

$$\begin{aligned}
 \text{Rt7J} = & +0.12577 * \text{POUZ} + 0.13588 * \text{CALC} + 0.15253 * \text{LAITI} \\
 & + 6.82866\text{E-}004 * \text{POUZ} * \text{CALC} + 3.74679\text{E-}004 * \text{POUZ} * \text{LAITI} \\
 & + 5.61875\text{E-}004 * \text{CALC} * \text{LAITI}
 \end{aligned}$$

- **Modélisation de la résistance à la traction par flexion à 7 jours (R_{c7j}):**



Figure(II.11) : diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 7 jours.



Figure(II.12) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 7 jours

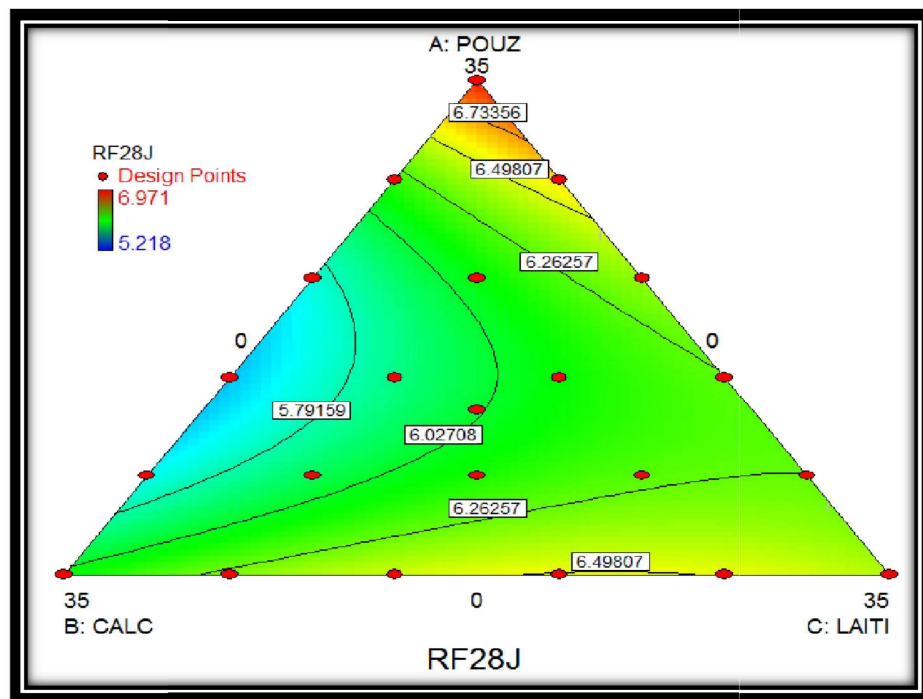
II.2.3.La résistance à la traction par flexion à 28 jours :**Tableau (II.7):Résistance à la traction par flexion à 28j**

	X ₁	X ₂	X ₃	Résistance à 28j	
	pouzzolane	Calcaire	laitier	Σ des ajouts	Rt 28j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	6,016
2	7	0	28	35	6,061
3	7	21	7	35	5,717
4	7	14	14	35	5,580
5	0	14	21	35	6,121
6	21	14	0	35	5,338
7	0	7	28	35	6,477
8	21	0	14	35	6,730
9	0	35	0	35	6,021
10	14	14	7	35	6,777
11	28	7	0	35	6,452
12	0	28	7	35	6,681
13	28	0	7	35	6,690
14	0	21	14	35	6,971
15	14	7	14	35	6,834
16	35	0	0	35	6,663
17	14	0	21	35	5,897
18	14	21	0	35	5,686
19	0	0	35	35	6,934
20	7	7	21	35	6,829
21	7	28	0	35	5,218
22	11,67	11,67	11,67	35	6,163

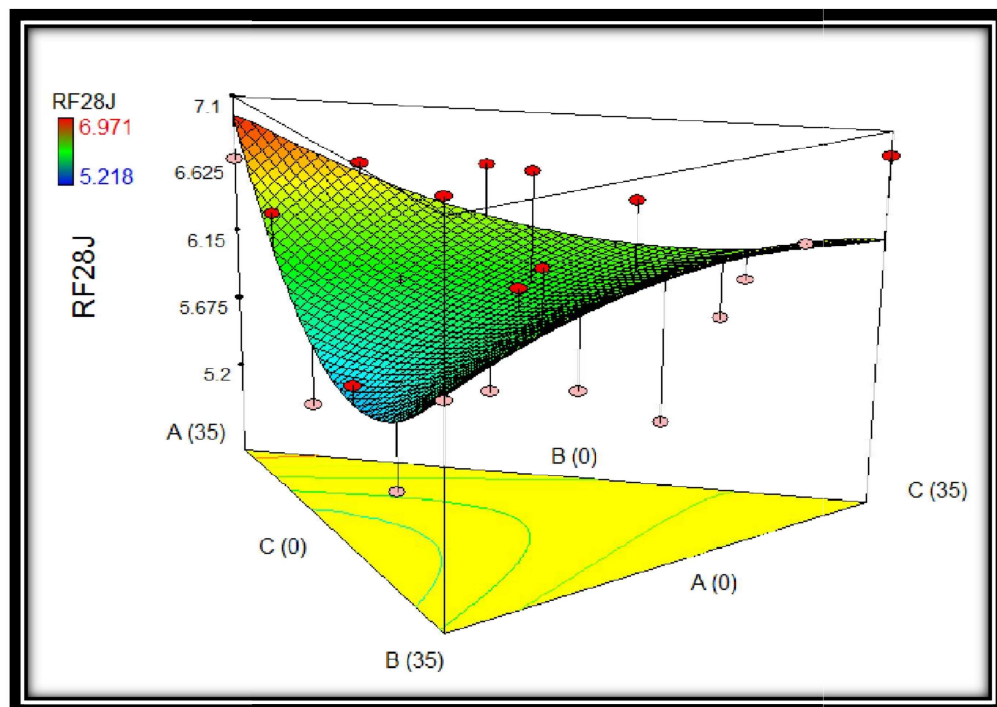
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE(Rt 7 jours) :

$$\begin{aligned}
 \text{Rt}_{28J} = & +0.19912 * \text{POUZ} + 0.17353 * \text{CALC} + 0.18258 * \text{LAITI} \\
 & - 2.97224\text{E-}003 * \text{POUZ} * \text{CALC} - 1.23912\text{E-}003 * \text{POUZ} * \text{LAITI} \\
 & + 8.27202\text{E-}004 * \text{CALC} * \text{LAITI}
 \end{aligned}$$

- **Modélisation de la résistance à la traction par flexion à 28 jours (Rc28j) :**



Figure(II.13) : diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 28 jours.



Figure(II.14) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 28 jours

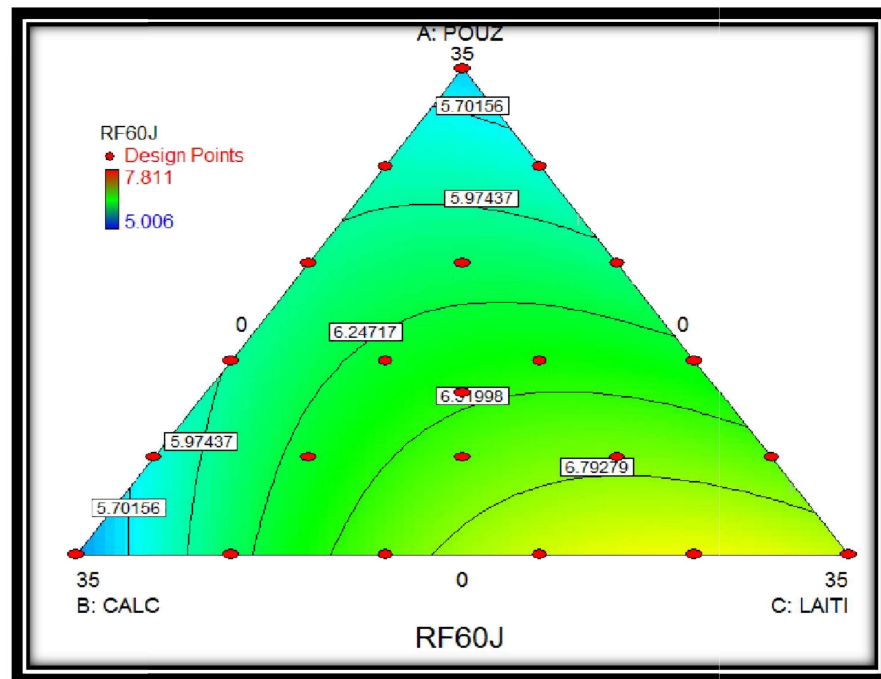
II.2.4. La résistance à la traction par flexion à 60 jours :**Tableau (II.8): Résistance à la traction par flexion à 60j**

	X ₁	X ₂	X ₃	Résistance à 60j	
	pouzzolane	Calcaire	laitier	Σ des ajouts	Rt 60j
N°	%	%	%	%	Mpa
1	21	7	7	35	6,337
2	7	0	28	35	6,520
3	7	21	7	35	6,372
4	7	14	14	35	6,267
5	0	14	21	35	7,811
6	21	14	0	35	7,433
7	0	7	28	35	7,319
8	21	0	14	35	6,980
9	0	35	0	35	5,412
10	14	14	7	35	6,530
11	28	7	0	35	5,409
12	0	28	7	35	6,735
13	28	0	7	35	5,161
14	0	21	14	35	5,880
15	14	7	14	35	7,207
16	35	0	0	35	5,541
17	14	0	21	35	6,007
18	14	21	0	35	5,006
19	0	0	35	35	6,818
20	7	7	21	35	6,286
21	7	28	0	35	5,864
22	11,67	11,67	11,67	35	5,373

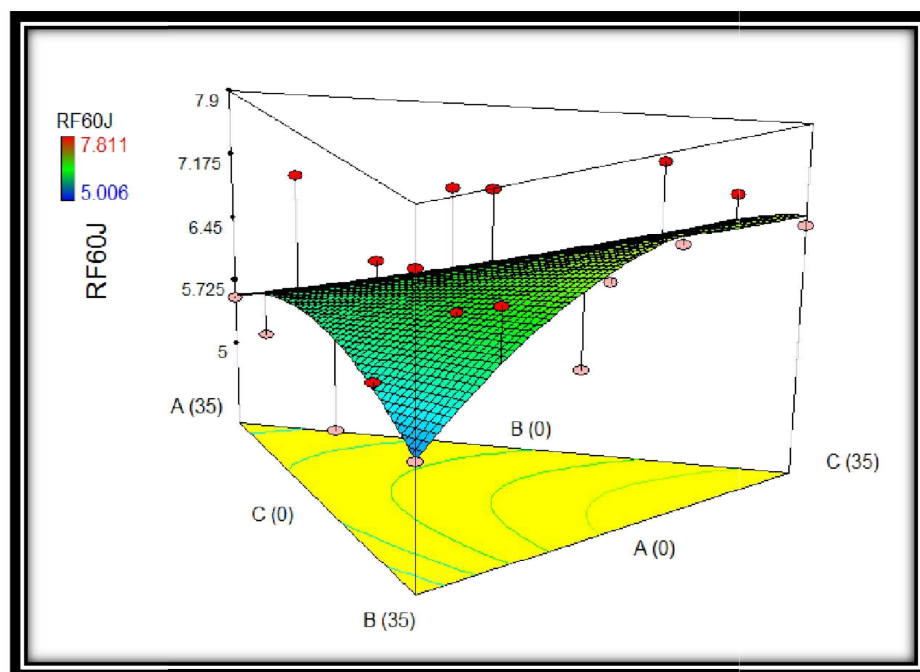
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE(Rt 60 jours) :

$$\begin{aligned}
 \text{Rt}_{60J} = & +0.15894 * \text{POUZ} + 0.15511 * \text{CALC} + 0.19810 * \text{LAITI} \\
 & + 1.71909\text{E-}003 * \text{POUZ} * \text{CALC} - 2.39975\text{E-}004 * \text{POUZ} * \text{LAITI} \\
 & + 2.20329\text{E-}003 * \text{CALC} * \text{LAITI}
 \end{aligned}$$

- **Modélisation de la résistance à la traction par flexion à 60 jours (Rc60j) :**



Figure(II.15) : diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 60 jours.



Figure(II.16) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 60 jours

À travers les résultats obtenus et présentés sous forme de triangles colorés, on remarque que la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de différents types de ciments n'a subi qu'une légère variation en baisse dans certains mixtes et en augmentation pour d'autres au cours du temps (2, 7, 28 et 60 jours), dans un ordre de 01 MPa ce qui demeure insignifiant, notons que cette

caractéristique de traction par flexion n'est pas compter parmi les performances intrinsèque des mortiers et des bétons.

II.3. Analyse et commentaire des résultats de la durabilité:

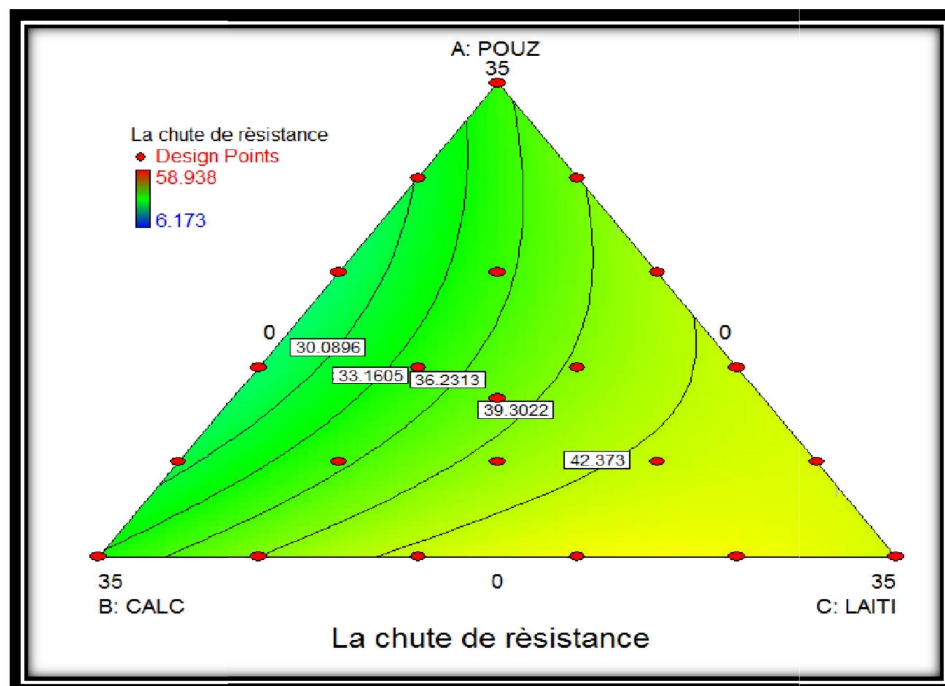
Le modèle choisi pour représenter la variation des résultats de la durabilité (perte de masse, la chute de la résistance) en fonction des constituants du ciment est **le modèle quadratique**.

II.3.1. La chute de résistance :

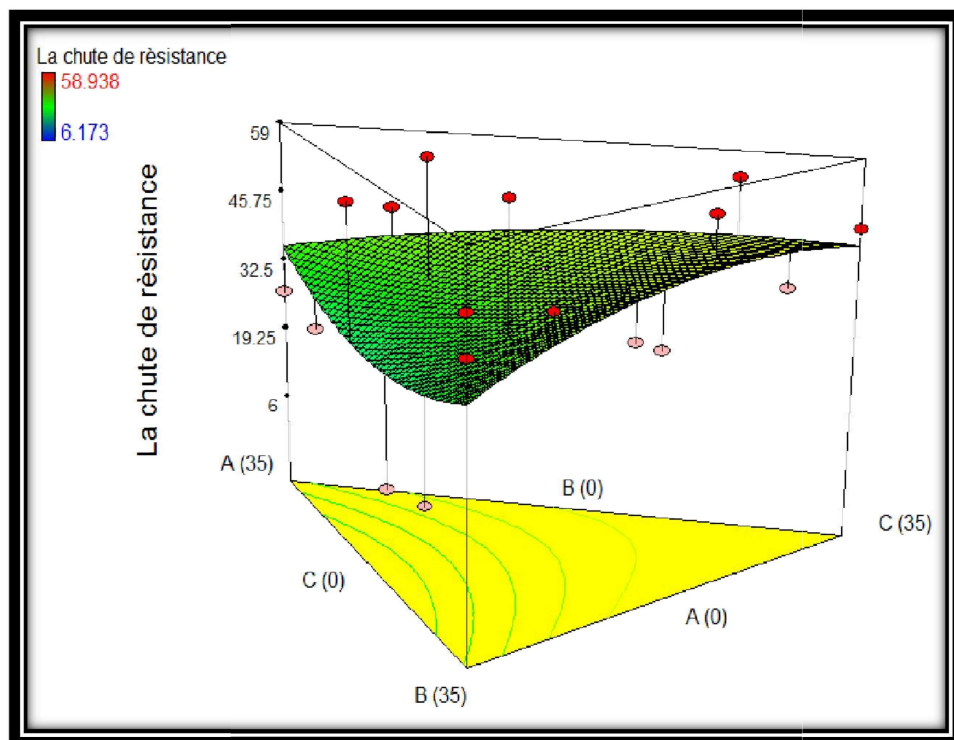
EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE :

La chute de rèsistance(%) = +1.01415* POUZ + 0.95936 * CALC + 1.23968* LAITI - 0.024452* POUZ * CALC + 9.80016E-003* POUZ * LAITI + 0.019430* CALC * LAITI

- **Modélisation de la chute de résistance :**



Figure(II.17) : diagramme triangulaire de la chute de résistance.



Figure(II.18) : Surface de réponse de la chute de résistance

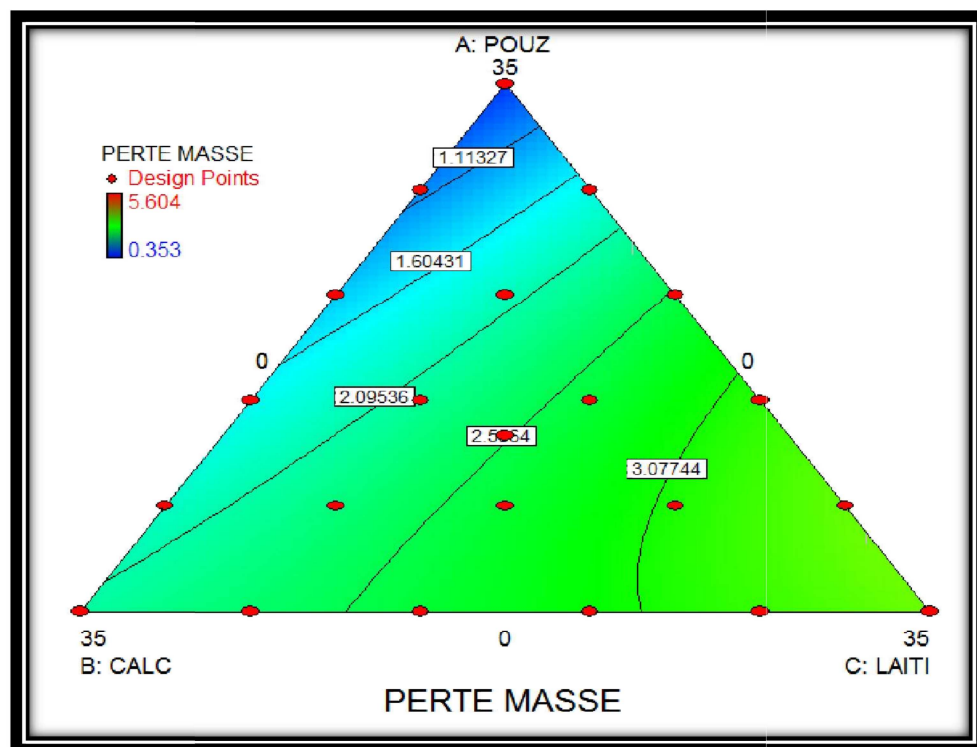
II.3.2 La perte de masse :

EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE :

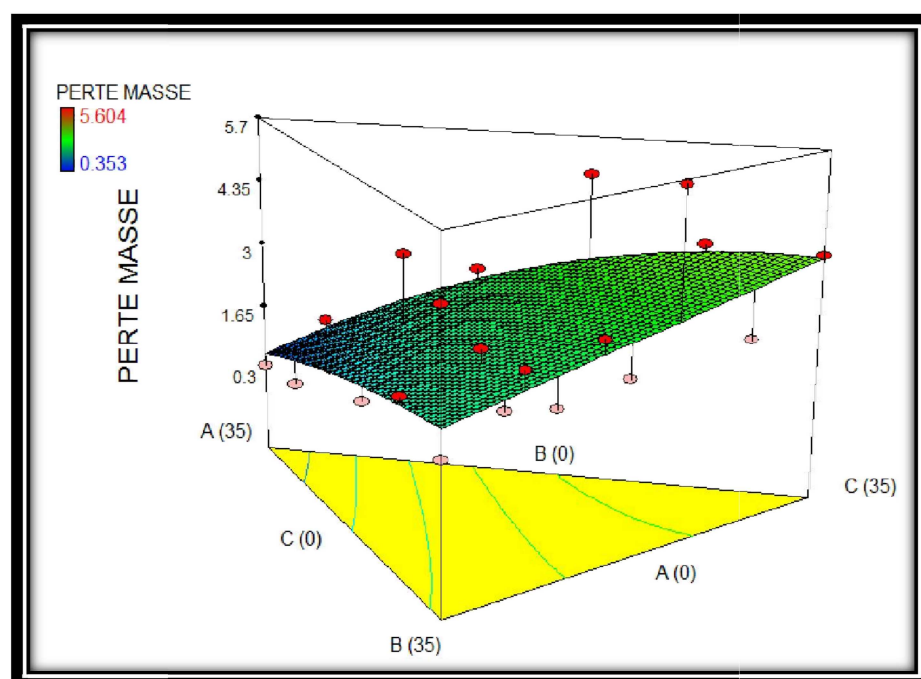
PERTE MASSE = +0.27129 * POUZ + 0.27336 * CALC + 0.26986 * LAITI

-2.23907E-003 * POUZ * CALC + 8.29447E-004 * POUZ * LAITI
+6.60108E-004 * CALC * LAITI

- Modélisation de la perte de masse:



Figure(II.19) : diagramme triangulaire de la perte de masse (%) des éprouvettes l'acide sulfurique.



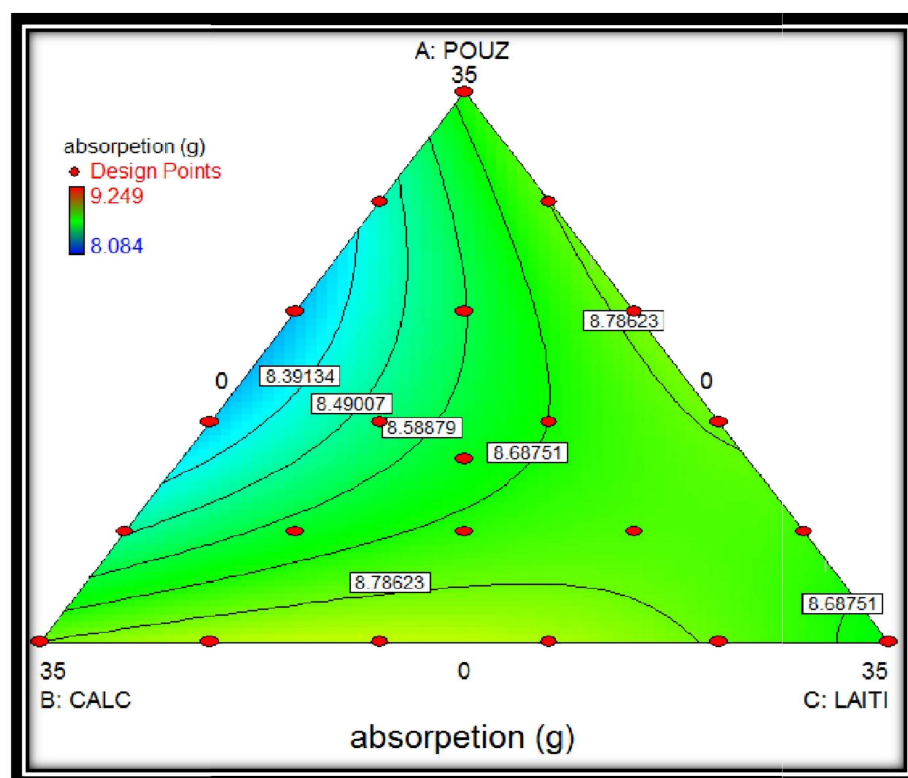
Figure(II.20) : Surface de réponse de la perte de masse

Pour la durabilité des mortiers testé dans un milieu agressif (H_2SO_4) dosée a 3.5 % , on remarque un rôle meilleur de la pouzzolane et du calcaire dans la contribution de l'amélioration de la durabilité confirmé par leur bonne tenue à la perte de masse et une faible chute de résistance , par contre l'ajouts laitier a un effet secondaire reflété par une chute assez importante de résistance et une tenue assez faible à la perte de masse dans le milieu agressif ci-dessus, Comparativement à la pouzzolane et au calcaire qui assurent les meilleurs rôle dans la durabilité.

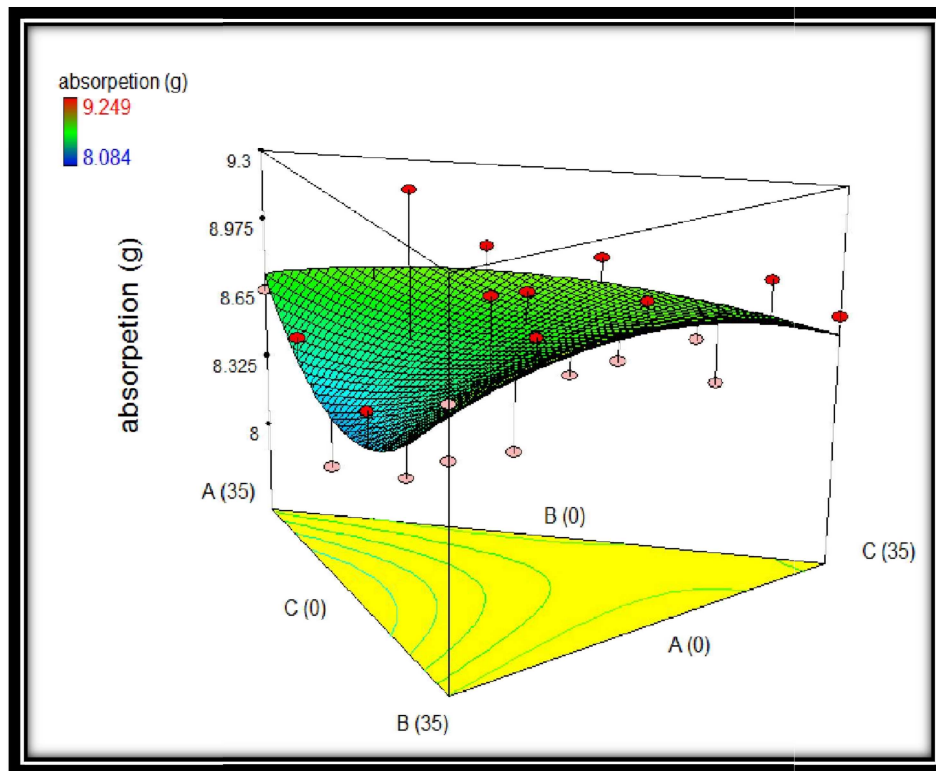
II.3.3.L'absorption :

EQUATION FINALE DU MODELE QUADRATIQUE :

$$\begin{aligned} \text{absorption (g)} = & +0.24928 * \text{POUZ} + 0.25113 * \text{CALC} + 0.24687 * \text{LAITI} \\ & - 1.51504E-003 * \text{POUZ} * \text{CALC} + 4.19361E-004 * \text{POUZ} * \text{LAITI} \\ & + 5.26990E-004 * \text{CALC} * \text{LAITI} \end{aligned}$$



Figure(II.21) : diagramme triangulaire de l'absorption.



Figure(II.22) : Surface de réponse de l'absorption.

À travers les résultats obtenus et présenter sous forme de triangles Figure(II.21) et la surface de réponse Figure(II.22), on remarque que le pouvoir d'absorption est important (couleur verte) pour un ciment Ternaire (laitier, pouzzolane) et pour un ciment quaternaire (laitier, pouzzolane et calcaire) avec des proportions proches, et le pouvoir d'absorption devient faible (couleur bleu) pour un ciment ternaire (pouzzolane, calcaire) ce qui traduit le pouvoir d'absorption importante du laitier et de la pouzzolane.

I. CONCLUSION GENERALE

Les résultats et les modèles obtenus à partir de cette étude expérimentale, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

✓ le comportement mécanique (compression ou traction par flexion) à jeune âge est influencée en premier lieu par le laitier qui offre une résistance meilleure dans les mélanges ou son pourcentage est dominant quant aux calcaire et la pouzzolane ont un effet secondaire comparativement à ce dernier (laitier).un effet significative des interactions sur la résistance initiale notamment les interactions (laitier- pouzzolane) et (laitier-calcaire-pouzzolane) en revanche l'interaction (pouzzolane –calcaire) influe négativement sur la résistance .

à partir de 7 jours on remarque une tendance d'amélioration des effets du laitier dans un ciment binaire ou avec dominance dans un ciment quaternaire en revanche un retrait est observé pour l'effet du calcaire et pouzzolane en ciment binaire

✓ on remarque une Influence significative de la teneur en laitier en ciment binaire ou dans un ciment quaternaire avec dominance sur le comportement mécanique du mortier testé à 28 jours confirmé par une résistance (compression ou flexion) à 28 jours meilleure dans les mélanges la ou le pourcentage du laitier est dominant ,donc le laitier s'avère le plus influent et vient en seconde lieu l'effet de la pouzzolane ou on remarque une évolution du résistance du ciment binaire avec laitier et ternaire (laitier, pouzzolane) , on revanche on remarque une faible influence du calcaire sur la résistance a 28jours ,quant aux interactions on note bien un effet insignifiant (laitier, pouzzolane) et (laitier, pouzzolane et calcaire) , il est de même pour la résistance à 60 jours

✓ Pour la durabilité du mortier testé dans un milieu agressif, on remarque un rôle meilleur du ciment binaire avec pouzzolane dans la contribution de l'amélioration de la durabilité confirmé par sa bonne tenue à la perte de masse et la chute de résistance par contre les autres ajouts calcaire et laitier ont un effet secondaire reflété par un chute assez importante de résistance et une tenue assez faible a la perte de masse dans un milieu agressif Comparativement a al pouzzolane qui s'avère assure le premier role dans la durabilité on négligeant .

Conclusion générale

En conclusion finale de ce travail, nous pouvons dire que l'approche des plans d'expériences et une méthode efficace et simple qui offre une meilleure analyse et une bonne interprétation par le moyen de modélisation et d'optimisation dans le cas où on confronte une étude expérimentale à plusieurs facteurs estiment influencer la réponse étudiée, là où l'analyse classique demeure complexe à cause des interactions de plusieurs facteurs, coûteux et long vu la nécessité d'un nombre d'essais très important.

II. Perspectives

L'étude de l'effet des adjuvants sur le comportement des ciments quaternaires

- [1]. fiches techniques <<tome1 >> les constituants des bétons et des mortiers.
- [2]. MESSAOUDANE BRAHIM .le cours, master I,II, universitaire de bordj Bou Arreridj, année universitaire (2012/2013).
- [3]. BOUGLADA. Mémoire de fin d'étude 2012/2013
- [4]. MESSAOUDANNE. le cours, master I,II, universitaire de bordj Bou Arreridj, année universitaire (2012/2013).
- [5]. MESSAOUDANNE. le cours, 3eme année, universitaire de bordj Bou Arreridj, année universitaire (2012/2013).
- [6]. BELAGUERA .le cours, master I, II, universitaire de bordj Bou Arreridj, année universitaire (2012/2013).
- [7]. SIT INTERNAITE
- [8]. L. PLISKIN: « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p-Paris1993.
- [9]. BOUGLADA, Mémoire de fin d'étude 2012/2013.
- [10]. GEORGE DREUX , JEANFESTA, nouveau guide du béton et de ses constituants , édition eurolles 1998 ,pp,8 :20 .
- [11]. J.THIEBAUT ET AL (1988 et 1992) ,Encyclopedia Universalis (Gypse) Livret Guide Pyrénées Centrales. R. Mirouse (Masson)
- [12]. E. GUILLON, «Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des ...équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [13]. LIVRE ‘’granulats, sols, ciments et béton, édition actualisé 2009,
- [14]. L. PLISKIN: « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p-Paris1993.
- [15]. K. KRENKLER “ Chemie des bauwesens ” tome I : anorganische chemie, springer- Verlag, Berlin, pp : 346-380 -1980.
- [16]. SOUMAYA AMINA BENSAFIR, Université de Mascara- Algérie – <<Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs >>, édition 2010.
- [17]. BYFORS K, « Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and PH values in ciment paste », Cem. Concr. Res, 1987, 17, 1, 115-130.
- [18]. MIDGLEY H.G. AND ILLSTON J.M, « The penetration of chlorides into hardened -cément pastes, Cem, Concr, Res », 1984, 14, 4, 546-558.
- [19]. BIJEN J. PROF. DR, «Blast furnance slag ciment », 1996.
- [20]. VORNOVITCH L. V, DRON R, «Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé », bull. Liaison Labo. P. ET Ch -83 – mai-juin 1975 – Réf. 1810.

- [21]. KAUSEL E, WHITMAN A.,MURRAY J .,ELSABEE F .- the spring method for embedded foundation –nuclear engineering and desing, vol . No48, 1978.
- [22].ACHOURAD.,LANOSCH.,JAUBERTHIER.,REDJEL B.,Influenced'unesubstitutionpartielleducimentpardulaitierdehautsfourneauxsurl arésistancedesmortiersen milieu acide, J. Phys.IVFrance, 118, 2004, 159-164.
- [23].AL-MOUDIOSB, Studies on the evaluation of permeability and corrosion resisting characteristics of Portland pozzolan concrete, MSt Thesis, Konh Kong Fahd University of petroleum and minerals, Dhahran, 1958.
- [24].BOSCJL.,KOUAMEK.,PERAJ., Improvement of concrete durability in tropical marine environment by adding metakaolin and superplasticisers, Proceedings of the Sixth International Conference on Durability of Building Materials and Components, Omiya, Japan, Vol. 1, 1993, p. 448-457.
- [25]. BOURDETTEB., Durabilité du mortier, Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, INSA Toulouse, 1994.
- [26].BROOMFIELD.J.P.,Assessing Corrosion Damage on Reinforced Concrete Structures, Corrosion and Corrosion Protection on Steel in Concrete, actes de conférence internationale, Université de Sheffield, R.-U., dir.publ.R.N. Swamy, vol. 1, p. 1-25. 1973
- [27]. BROOMFIELD J.P.,Assessing Corrosion Damage on Reinforced Concrete Structures, Corrosion and Corrosion Protection on Steel in Concrete, actes de conférence internationale, Université de Sheffield, R.-U., dir.publ.R.N. Swamy, vol. 1, p. 1-25. 1973
- [28].BUILM.,Contribution l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante, thèse de doctorat del'écolenationale des pontset chaussées, Rapport de recherches du LCPC n° 92, 1979, 7p.
- [29].COILLARD J.,Procédés de traitement des lisiers de porc étudiés en France. Ingénieries- EAT, Vol. 10, 1997, p. 17-33.
- [30]. S.MANSOUR ,M. GHRICI, M . KENAI : "Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et bétons ." Congre international sur la Réhabilitation des Constructions et Développement Durable . Alger 3 et 4 Mai- 2005.
- [31]. BELAGUERA A , le cours, master I,II, universitaire de bordj Bou Arreridj, année universitaire (2012/2013)
- [32].COLLINFEVREI.,Use of metakaolin in manufacture of concrete products, Poster 479, CIB, 1992, Montreal, Canada.
- [33].CORPEN, Des indicateurs azote pour gérer des actions de maîtrise des

pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire. Projet de brochure. Sous groupe indicateur, octobre 2006.

-[34]. CORPEN, Estimation des rejets d'azote et de phosphore des élevages de porcs, 1996, 23p.

-[35]. H. Weigler, S. Karl "Béton : art der Herstellung - Eigenschaften" Verlag Ernest and Sohn, Berlin, pp 383-404 – 1989.

-[36]. K. Krenkler "Chemie des Bauwesens" tome I : anorganische Chemie, Springer-Verlag, Berlin, pp : 346-380 -1980.

-[37]. A. Leroux, S. Orsetti "les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés" Bulletin de liaison des Laboratoires Centrales des Ponts et Chaussées, N° 225, Réf 4316, pp 41-50 Mars-Avril -2000.

-[38]. M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage »,..... Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.

-[39]. I.El Khadiri, A.Diouri A.Boukhari, J. Aride and F.Puertas "Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan Portland" Cement and Concrete Research – Vol 32 , pp 1597-1603-2002.

-[40]. G.Menendez and Al "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag" Cement and Concrete Research – Vol 25 , pp 61-67-2003.

-[41]. M.I. Khan and C.J. Lynsdale "Strength, permeability and carbonation of high performance concrete". Cement and Concrete Research – Vol 32, pp 123-131-2002

-[42]. C.Tasdemir "Combined effect of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete" Cement and Concrete Research, Vol 33, N° 10, pp 1637-1642- Oct 2003.

-[43]. S.Tsivilis, J. Tsantilas, G. Kakali, E. Chaniotakis and A. Sakellariou "The permeability of Portland limestone cement concrete" Cement and Concrete Research – Vol 33 , N° 9 , pp 1465- 1471-Sep 2003.

-[44]. M. O'Farrell, S. Wild and B. B. Sabir "Resistance attack of ground brick-PC mortar. Part I: Sodium Sulphate Solution" Cement and Concrete Research - Vol 29, pp 1781-1790-1999.

-[45]. I.Janotka and L.Krajci "Utilization of natural Zeolite in Portland Pozzolan cement of increased sulphate resistance" In "Durability of Concrete Proceedings" Fifth International Conference, Barcelona, Spain-Vol I, pp 223-236-2000.

- [46]. D.M.Mulenga, J. Stark, P. Nobst “Thaumasite formation in concrete and mortars containing fly ash ” Cement & Concrete Composites- N0 25, pp 907-912-2003.
- [47]. S. T. Lee ,H. Y. Moun, R. N. Swamy “sulphate attack and role of silica fume in resisting strength loss” Cement & Concrete Composites- Vol 27 , pp 65-76-2005.
- [48]. Y.Senhadji “ L’influence de la nature du ciment sur le comportement de mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) ” Mémoire de Magister – I.G.C.M.O – ORAN –2006.
- [49]. S. Sayamipuk “Strength and durability of mortars containing métakaolin from Thailand” PhD Thesis School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology – 2001.
- [50]. S. Mansour “ Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires ” Mémoire de Magister – Université SAAD DAHLEB – BLIDA - 2003.
- [50]. M. Vigier , pratique des plan d’expériences : méthodologie Taguchi. les éditions d’organisation, 1988.
- [51]. G. Frédéric, “modélisation et optimisation par plan d’expérience d’un moteur a commutation électronique”. Thèse de doctorat de l’université des science et technologie de Lille, janvier 1995.
- [52]. M. Pillet, Introduction aux plans d’expérience par la méthode Taguchi. Editions d’organisation université ,1992.
- [53]. D. Benoist et Y.Tourbier , plan d’expérience construction et analyses. Editeur lavoisier TEC et DOC ,1997.
- [54]. SIOUDA Mayada «analyse physico-chimique et microbiologique des eaux superficielles » Centre Universitaire de BBA 2009. Date d’analyse : 13/05/2008

III. INDEXE DES TABLEAUX

PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LE CIMENT

Tableau(I.1) : Composition chimique et minéralogique du clinker.....	8
Tableau(I.2) : Désignation des différents types de ciment en fonction de Composition.....	10
Tableau(I.3) : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.....	11

<i>CHAPITRE III : LES AJOUTS MINÉRAUX</i> Tableau(III.1) : Classification des ajouts selon leur réactivité.....	17
--	----

Tableau(III.2) : La composition chimique moyenne du laitier.....	20
--	----

CHAPITRE IV : EFFETS DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES PERFORMANCES

<i>MECANIQUES ET LA DURABILITE DES MATERIAUX</i> Tableau (IV.1.): Composants du béton menacés par la corrosion.....	30
Tableau (IV.2): Mesure d'expansion des barres de mortier.....	34
Tableau (IV.3): Réduction de perte de masse des mortiers cubiques.....	35

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I : PREPARATION DES MATERIAUX UTILISES

Tableau (I.1): Analyse granulométrique du sable normalisé.....	53
--	----

CHAPITRE II : MÉTHODES ET PROTOCOLES D'ESSAIS

Tableau (II.1) : Les essais de caractérisation des matériaux.....	56
Tableau (II.2) : Les essais de caractérisation sur mortier durci.....	56

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Tableau (III.1) : Equivalent de sable d'Oued Essouf.....	64
Tableau (III.2) : La masse volumique et SSB des composants.....	65

Tableau (III.3) : Les compositions chimiques de clinker et ajouts.....	65
Tableau (III.4) : La Surface spécifique Blaine et la masse volumique dechaque type de ciment.....	66
Tableau (III.5): Analyses physico-chimiques de l'eau de gâchage.....	67

PARTIE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

CHAPITRE I : LES RESULTATS OBTENUS

Tableau (I.1): La résistance mécanique à la compression.....	69
Tableau (I.2): La résistance mécanique à la traction par flexion.....	70
Tableau (I.3): La chute de la résistance.....	71
Tableau (I.4): L'absorption (%).....	72
Tableau (I.5): La perte de masse (%).....	73

CHAPITRE II : MODELISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Tableau (II.1): Résistance à la compression à 2jours.....	74
Tableau (II.2): Résistance à la compression à 7j.....	76
Tableau (II.3): Résistance à la compression à 28j.....	78
Tableau (II.4): Résistance à la compression à 60j.....	79
Tableau (II.5): Résistance à latraction par flexion à 2j.....	82
Tableau (II.6): Résistance à latraction par flexion à 7j.....	84
Tableau (II.7): Résistance à la traction par flexion à 28j.....	86
Tableau (II.8): Résistance à la traction par flexion à 60j	88

IV .INDEXE DES FIGURES

PREMIER PARTIE :SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITR I : LE CIMENT

Figure (I.1) : Stades de fabrication du ciment.....	5
Figure (I.3) : Concassage de clinker	7
Figure (I.5) : Image par le MEB d'un clinker	8
Figure (I.6) : Image de gypse par le MEB	9

CHAPITRE II : HYDRATATION DU CIMENT

Figure (II.1) : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), la porosité est repérée par	14
--	----

CHAPITRE III : LES AJOUTS MINERAUX

Figure (III.3) : Le Laitier	20
--	----

CHAPITRE IV : EFFETS DES AJOUTS MINERAUX SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES ET LA DURABILITE DES MATERIAUX

Figure (IV.1.) : Représentation schématique de la dégradation d'une pâte de ciment soumise à la lixiviation par une eau pure déminéralisée stabilisée à pH 7	26
Figure (IV.2) : L'attaque par les sulfates.....	28
Figure (IV.3) : Développement de la résistance en fonction de l'âge	31

CHAPITRE VI : PLANS D'EXPERIENCES

Figure(I.6) : Vocabulaire d'un plan d'expérience.....	36
---	----

DEUSIEME PARTIE :ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITR II : METHODES ET PROTOCOLES D'ESSAIS

Figure (II.2) : Schéma de traction par flexion de trois points.....	62
Figure (II.3) : Schéma de l'essai de compression.....	62

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Figure (III.1) : Courbe granulométrique du sable normalisé..... 64

TROISIEME CHAPITRE :CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE II : MODELISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Figure (II.1) : Diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 2 jours 75

Figure (II.2) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 2 jours..... 75

Figure (II.3) : Diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 7 jours 77

Figure (II.4) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 7 jours 77

Figure (II.5) : Diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 28 jours 80

Figure (II.6) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 28 jours 80

Figure (II.7) : Diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 60 jours 81

Figure (II.8) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 60 jours 81

Figure (II.9) : Diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 2 jours..... 83

Figure (II.10) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 2 jours..... 83

Figure (II.11) : Diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 7 jours 85

Figure (II.12) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 7 jours..... 85

Figure (II.13) : Diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 28 jours.... 87

Figure (II.14) : Surface de réponse de la résistance à la traction par flexion à 28 jours..... 87

Figure (II.15) : Diagramme triangulaire de la résistance à la traction par flexion à 60jours..... 89

Figure (II.16) : Surface de réponse de la résistance à la compression à 60 jours 89

Figure (II.17) : Diagramme triangulaire de la chute de résistance 90

Figure (II.18) : Surface de réponse de la chute de résistance 91

Figure (II.19) : Diagramme Triangulaire de la perte de résistance (%) des éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique 92

Figure (II.20) : surface de repense de la perte de résistance (%) des éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique 92

Figure (II.21) : Diagramme triangulaire de l'absorption 94

Figure (II.22) : Surface de réponse de l'absorption 94

INDEXE

VI. INDEXE DES PHOTOS

PREMIERE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LE CIMENT

Photo (I.4) : Clinker après broyage.....	7
Photo (I.7) : Le gypse après broyage.....	9
Photo (I.8) : Les ajouts après le broyage.....	9

CHAPITRE III : LES AJOUTS MINÉRAUX

Photo(III.1) : Calcaire après le broyage.....	18
Photo (III.2): Pouzzolane après broyage.....	19
Photo(III.4) : Laitier après le broyage.....	20

DEUSIEMME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE I : PRÉPARATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Photo (I.1) : Le séchage des ajouts.....	47
Photo (I.2) : Broyeur à boulet.....	48
Photo (I.3) : Ciment avant l'agitation.....	52
Photo (I.4) : Ciment après l'agitation.....	52
Photo (I.5) : Sable normalisé.....	52
Photo (I.6) : Acide sulfurique.....	54

CHAPITRE II : MÉTHODES ET PROTOCOLES D'ESSAIS

Photo (II.1): Mode de conservation des éprouvettes.....	61
Photo (II.4): Eprouvettes de mortiers immergés dans la solution acide.....	63