

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Civil



جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعرييج »

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم هندسة مدنية

Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

THÈME : Etude de la durabilité d'un ciment avec ajout

Préparé par :

Ghomrani khalida

Bentouhami fatima

Soutenu le : 22/06/2016

Devant le jury :

Président : Achour Yacine

M.AA Université de BBA

Encadreurs: bouglada med salah

M.AA Université de BBA

Noui ammar

M.AA Université de BBA

Examineur: Loumachi lazhar

M.AA Université de BBA

Examineur : Tabet souad

M.AA Université de BBA

Année Universitaire 2015-2016

REMERCIEMENTS

Nous témoignons que c'est par la grâce de Dieu le tout puissant et miséricordieux, d'aide incessante, qu'il nous a porté et d'orientation imminente qu'il nous a accordé pour achever à ce travail.

Merci

... à nos promoteurs Mr. Bouglada Mohamed Salah et Noui Ammar pour le suivi, les conseils et les encouragements qu'il nous a attribués.

... à Nos chers collègues qui nous beaucoup aider.

... à Tous les enseignements de Génie Civil

... à l'ensemble de notre jury de thèse, qui a bien voulu examiner ce travail.

ACHOUR YACIN, TABET SOUAD, LOUMACHI LAZHER

... à tous les responsables du Laboratoire de Génie Civil, ZOBIR, FARID , RIM, FATIHA qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

... à toute la famille : GHOMRANI ET BENTOUHAMI

Dédicaces

Avant tout, je tiens à remercier le dieu, et l'unique qui m'a offert le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie

Je dédie ce modeste travail à :

A mon père qui est ma force de travail et symbole de solidité pour son aide continuelle, matérielle et morale, sans lui je n'aurais aboutir. Tu m'as permis de continuer ce travail sans jamais abandonner. Un grand merci « Papa »

A celle qui a veillé et sacrifié ses belles nuits, pour me voir réussir, pour me voir un jour comme je suis

Ma très chère mère, ma première et dernière maîtresse, symbole d'amour, de sacrifice, d'encouragement et de soutien.

A mes frères: djamele , adel, hakim, issam

A mes sœur : samra, ilham

A ma chers binome « fatima»

A mes fidèles amies amel, massaouda

A mes amies : donya, sara, intisar, samira, najet, hadjer, karima, sara, amina, massaouda, houda,

Et toutes mes amies proches ou loins.

A tous ceux qui sont chers, et qu'ils trouvent leur place dans mon cœur.

A mes camarades de promotion.

A tous ceux qui m'ont enseigné.

Khalida

Dédicaces

Tout d'abord je remercie le dieu qui a donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail

Je dédie ce travail ce modeste travail :

A ma très chère mère, symbole grandiose de patience et de beaucoup d'amour.

A mon très cher père, pour sa compréhension et pour ce qu'il a enduré pour m'offrir le bonheur et Leur encouragement.

A mon mari : KHALIL, Tu m'as redonné confiance au moment où j'en avais le plus besoin.

A ma très chère frères: SOFIANE.

A mes très chères sœurs : YASMINA, RAHMA, FULLA.

A mon binôme KHALIDA, et je remercie mon camarade pour sa gentillesse, sympathie et sa compréhension.

A tous les membres de ma famille et la famille de mon mari.

A tous mes amis surtout NADJET.

A mes camarades de promotion.

A tous ceux qui m'ont enseigné.

** FATIMA **

Etude de la durabilité d'un ciment avec ajouts

Résumé

Les déchets cimentaires, en l'occurrence les ajouts minéraux, représentent actuellement une grande partie dans les développements les plus récents de l'industrie cimentaire et la production des ciments compte tenu de leurs avantages technico-économiques car leur utilisation contribue à l'amélioration des propriétés de la matrice cimentaire et d'autre part elle permet de réduire la consommation du clinker, en contribuant d'une manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement .

Dans ce travail expérimental on projette d'étudier l'idée de remplacer partiellement le clinker par des ajouts minéraux pour préparer des mélanges de ciments dans lesquelles on fait varier le pourcentage des ajouts utilisés dans cette étude , le laitier , la pouzzolane et le calcaire avec 5% , 10% et 20% par substitution du clinker qui demeure inchangé dans tous les mélanges avec un pourcentage de 75% et 5% pour le gypse.

Des pâtes de ciment et des mortiers sont confectionnés à base de ces mélanges de ciments binaire ,ternaire et quaternaire dont l'objectif d'évaluer l'effet de ces ajouts sur le comportement mécanique et la durabilité de ces mortiers et des pâtes préparées là où les ajouts sont utilisés séparément le cas d'un ciment binaires et l'estimation de l'interactions de ces ajouts le cas d'un ciment ternaire ou binaire ou on utilise deux ou trois ajouts à la fois.

Pour évaluer la durabilité , l'objet de cette étude des tests de perte de masse et chute de résistance ont été effectués sur des mortiers et des pâtes préparés après conservation de ces derniers dans deux milieux agressifs (HCl ;H₂SO₄) qui favorisent la dégradations et permettent l'évaluation de la durabilité.

Mot clés : ciment, ajouts, mortier, durabilité, HCL, H₂SO₄.

دراسة ديمومة الإسمنت مع الإضافات

ملخص

النفائيات الإسمنتية أو الإضافات المعدنية تشغل حالياً حيز كبيراً في التطورات الحديثة للصناعة الإسمنتية وإنتاج الإسمنت بالنظر لما تتمتع به من الفوائد الفنية والاقتصادية لان استخدامها يساهم في تطوير الخصائص الإسمنتية و يقلل من استهلاك الكلنكر، ويساهم بطريقة بسيطة وغير مكلفة لحل المشاكل البيئية.

في هذا العمل التجريبي نقوم بدراسة فكرة الاستبدال الجزئي للكلنكر بالإضافات المعدنية لتحضير خلطات الاسمنت على اساس التغيير في كمية الإضافات المستعملة في هذه الدراسة (الخبث، البوزلان والحجر الجيري) بنسبة 5% و 10% و 20% عن طريق الإحلال من الكلنكر الذي يستخدم بنسبة ثابتة في جميع الخلطات (75% كلنكر و 5% جبس).

المونة و العجينة التي أعدت على اساس هذه الخلطات الاسمنتية (الثنائية، الاسمنت الثلاثي والرابعي) تهدف إلى تقييم مدى تأثير هذه الإضافات على السلوك الميكانيكي و متانة هذه المونة و العجينة ومدى مقاومتها في وسط يحوي عوامل ضارة ، وذلك سواء في حالة أعدت فيها هذه الإضافات على حدة كما هو الحال في الاسمنت الثنائي او متى تسنى تقدير تجاوزات و تفاعلات هذه الإضافات في حالة الاسمنت الثلاثي أو الرابعي باستخدام اثنين أو ثلاثة من الإضافات في وقت واحد.

لتقييم الاستدامة، تم تنفيذ سلسلة من التجارب كدراسة نقص الكتلة للمونة والعجينة الاسمنتية وكذا انخفاض المقاومة للمونة التي أعدت و تم حفظها في وسائط حمضية ، حمض الهيدروكلوريك و حمض الكبريت التي توفر محيط يعزز تهديم المونة والعجينة و تسمح من تقدير مدى مقاومتها للوسط الضار وتمكننا من تقييم الاستدامة.

الكلمات الرئيسية: الاسمنت، الإضافات، المونة ، الاستدامة، حمض الهيدروكلوريك ، حمض الكبريت.

Sommaire

Introduction générale

Contexte..... 1
Problématique..... 1
Objectif 2
Méthodologie du travail 2

Première partie

Synthèse bibliographique

Chapitre I :Généralités sur les ciments

I-1- Introduction 4
I-2-Historique 4
I-3-Définition du ciment..... 5
I-4-Etape de fabrication du ciment.....5
 I-4-1-Extraction et concassage des matières premières 5
 I-4-2-Mélange et réduction en farine de la matière Première 6
 I-4-3-Transformation par cuisson de la farine en clinker 6
 I-4-4-Mouture du clinker avec le gypse et les ajouts 6
I-5-Les constituants du ciment 7
 I-5-1-Le Clinker 7
 I-5-2-Le Gypse (CaSO₄)..... 8
 I-5-3-Les ajouts minéraux 9
I -6-Classification du ciment 9
 I -6-1-A partir de leur composition 9
 I -6-2-A partir de leur classe de résistance..... 10
I-7-Conclusion..... 11

Chapitre II : Hydratation du ciment

II-1-Introduction.....	12
II-2- Réactions d'hydratation	12
II-3-Hydratation du ciment portland	13
II-3-1-Hydratation du silicate tricalcique.....	14
II-3-2-Hydratation du silicate bicalcique (β C2S)	14
II-3-3-Hydratation de l'aluminate tricalcique (C3A).....	14
II-3-4- Hydratation de l'aluminoferrite de calcium (C4AF).....	15
II-4-Les réactions pouzzolaniques	15
II-5- Hydratation du laitier	16
II-6-Conclusion	17

chapitre III: Les ajouts minéraux

III-1-Introduction.....	18
III-2-Définition des ajouts minéraux.....	18
III-3-Classification des ajouts minéraux	19
III-3-1-Principaux ajouts minéraux inertes	19
III-3-1-1-Fillers Calcaires (L)	19
III-3-1-2-Schistes calcinés	20
III-3-2-Principaux ajouts minéraux actifs	20
III-3-2-1-Le laitier granulé de haut fourneau (S).....	20
III-3-2-2-La pouzzolane naturelle ou artificielle (Z)	22
III-3-2-3-Les cendres volantes siliceuses ou calciques	25
III-3-2-4-La fumée de silice.....	25
III-4-Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux	25
III-4-1-Intérêt du point de vue technique.....	26
III-4-2-Intérêt du point de vue économique.....	26
III-4-3-Intérêt du point de vue environnemental	26
III-5-L'utilisation des ajouts en Algérie	26
III-6-Influence des ajouts sur les performances mécaniques	27

III-7-Influences des ajouts vis-à-vis des attaques acides	28
III-8-Rôle des additions minérales vis-à-vis de la carbonatation.....	29
III-9-Durabilité d'un béton dans un milieu sulfatique	29
III-10-Conclusion	29

Chapitre IV: la durabilité

IV-1-Introduction	31
IV-2-le type d'agents agressifs.....	32
IV-3- facteur de la durabilité	33
IV-3-1-Introduction	33
IV-3-2- La fissuration	33
IV-3-3-La porosité.....	33
IV-3-4-la perméabilité.....	33
IV-4-Les pathologies du béton.....	33
IV-4-1- La Carbonatation.....	33
IV-4-2-La corrosion des armatures	35
IV-4-2-1-Introduction	35
IV-4-2-2-Généralités	35
IV-4-2-3-Influence du pH sur la corrosion	36
IV-4-2-4-Effets de la corrosion.....	36
IV-5-Phénomène de Lixiviation.....	36
IV-6-Phénomène d'alcali-réaction	37
IV-7-Mécanisme d'action.....	37
IV-7-1-Action des milieux acides	37
IV-7-1-1-action Par sulfate de sodium.....	38
IV-7-1-2-action Par sulfate de magnésium	39
IV-7-2-Action des bases.....	39
IV-7-3-Action de la température.....	39
IV-8-Paramètres de défense du béton dans un environnement sulfatique	40
IV-9-Conclusion.....	40

Chapitre V: plans d'expériences

V-1- Introduction.....	41
V-2- Définition	41
V-3- Intérêts des plans d'expériences	42
V-4- Terminologie.....	42
V-5- Méthodologie des plans d'expériences	43
V-5-1- La recherche des facteurs influents	43
V-5-2- La modélisation	44
V-5-3- L'optimisation.....	44
V-6-Différents types de plans d'expériences.....	44
V-6-1- Plans factoriels complets à deux niveaux	44
V-6-2- Plans fractionnaires à deux niveaux.....	45
V-6-3- Plans de mélange.....	45
V-6-3-1- Modèles représentatifs d'un mélange.....	45
V-6-3-2- Différents types de mélanges.....	46
V-7-outils decalcul.....	47
V-8- Présentation de logiciel « Design-Expert »	47
V-9- Conclusion	48

Deuxième partie

Etude expérimentale

Chapitre I: préparation des matériaux utilisés

I-1-Introduction	50
I-2-préparation du ciment utilisé	50
I-2-1-l'extraction des matières première.....	50
I-2-2-Etape de préparation des constituants du ciment.....	52
I-2-2-1- Le séchage	52
I-2-2-2-Le concassage.....	52
I-2-2-3-Le broyage.....	53

I-3-préparation des mélanges étudiés	53
I-3-1-Introduction.....	53
I-3-2-Niveau des facteurs (ajouts).....	54
I-3-3-Contraintes de construction du plan	54
I-3-4- tableau de la Matrice des expériences (Plan de mélange)	54
I-3-5-Pesage et étiquetage	55
I-3-6-Agitation	55
I-4-Le sable.....	55
I-5-Eau	55
I-6- Préparation de milieu agressif	55

Chapitre II: Méthode d'essais

II-1- Introduction.....	57
II-2- Les essais réalisés	57
II-3- Méthodes d'essais et normes	57
II-4- Méthodes d'essais et lieux de réalisation	59
II-5- Description et mode opératoire des essais	59
II-5-1- Essais sur ciments.....	59
II-5-1-1- Ciments anhydre	59
II-5-1-1-1- Masse volumique absolue.....	59
II-5-1-1-2- Mesure de la finesse.....	60
II-5-1-2- Ciment hydraté.....	63
II-5-1-2-1- Mesure de la consistance de la pate.....	63
II-5-1-2-2- Mesure des temps de début et fin de prise	65
II-5-2- Essais sur mortier	67
II-5-2-1- Mesure des résistances à la compression et à la flexion.....	67
II-6- Essais sur la durabilité	69

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés

III-1-le sable	71
III-2- Caractérisation des composants cimentaires	71

III-3- L'eau de gâchage 72

Troisième partie

Résultas et interpritation

Chapitre I:Les résultats obtenus

I-1- Introduction 75

I-2- Les résultats 75

 I-2-1-La surface spécifiques blaine et masse volumique de chaque mélange..75

 I-2-2-Préparation des pates 76

 I-2-3-Le mortier..... 82

Conclusion général..... 100

Perspectives.....102

Index..... 103

I-INDEXE DES FIGURES 103

II.INDEXE DES TABLEAUX 105

III-INDEXE DES PHOTOS..... 107

Références 108

Contexte

Le ciment est un matériau que tout le monde croit connaître tant qu'il est courant. On l'emploie en effet pour fabriquer le béton qui est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Une construction est généralement réalisée pour assurer une satisfaction, une sécurité assez longtemps qu'il est possible, longévité satisfaisante veut dire une construction durable sans aucun désordre, sa demeure toujours le souhait et l'objectif de tous constructeurs, la durabilité est liée étroitement aux propriétés du béton plus précisément à la matrice cimentaire, d'où le béton est autant durable que le mortier offre des propriétés plus performantes d'où l'incorporation des ajouts minéraux dans les ciments permet d'améliorer les caractéristiques des mortiers comme il a été mis en évidence dans plusieurs recherches.

Il semble difficile aujourd'hui de parler de durabilité du mortier sans mentionner le positionnement des bétons vis-à-vis du développement durable. Bien entendu, la durabilité est l'un des facteurs les plus importants dans le développement durable.

Les ouvrages en béton sont conçus et construits pour durer. Pour combien de temps? Il est difficile de répondre à cette question.

Valoriser les déchets minéraux semble une approche réussie pour contribuer à la durabilité des constructions et une action efficace pour le concept du développement durable.

Problématique

Les matrices cimentaires confectionnées avec des ajouts ont fait l'objet de plusieurs études, toutefois aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier fermement les effets de telles additions, vis-à-vis des performances des mortiers, car le mélange des différents matériaux n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre différents constituants. Par ailleurs, le mélange de matériaux compatibles ne conduit pas toujours aux mêmes résultats ; des interactions (ou interactivités) éventuelles peuvent exister entre les différents types de matériaux.

La préoccupation de la recherche demeure toujours la mise au point d'un liant dans lequel sont incorporés des déchets industriels (laitiers) ou des ressources naturelles telles que la pouzzolane, le calcaire .

Plusieurs études ont optés pour la caractérisation des ajouts afin d'aboutir à une maîtrise et une optimisation de l'introduction de ces ajouts dans la fabrication des ciments.

L'intérêt technologique de l'utilisation des ajouts réside dans le fait qu'ils permettent d'améliorer les performances du ciment et de valoriser les déchets cimentaires.

Objectif

L'objectif principal de cette étude est d'apporter une contribution à l'évaluation des effets des ajouts cimentaires tels que le laitier, la pouzzolane naturelle et le calcaire sur la durabilité des ciments vis-à-vis des milieux agressifs.

L'intérêt de cette étude consiste à :

Evaluer expérimentalement la contribution des ajouts minéraux (pouzzolane, calcaire et laitier) à la durabilité des mortiers vis-à-vis les milieux agressifs.

Evaluer l'effet de l'interaction entre ajouts dans le cas de l'utilisation de plusieurs ajouts qui diffère sur le plan composition et fonctionnel.

Classer les ajouts d'après leurs contributions à la durabilité.

En fin ce travail présente une étude modeste pour caractériser les ajouts vis-à-vis l'amélioration de la réponse mécanique ainsi que la durabilité du mortier au ciment avec ajouts.

Méthodologie du travail

Le contenu du mémoire se repartit en 03 grandes parties :

La première partie : est destinée à l'étude bibliographique où nous avons donnée 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 consacré à l'expérimentation, nous présentons la méthodologie de préparation des ciments, l'établissement des plans d'expérience, les méthodes d'essais réalisés et la caractérisation des matériaux utilisés.

Troisième partie : donne les résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation.

La dernière partie du 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



Généralités sur les ciments

I-1- Introduction

Les chercheurs ont longtemps été intrigués par la composition d'une roche naturelle présente à Portland, en Angleterre, dont les remarquables propriétés hydrauliques (faculté de durcir en présence d'eau) laissaient entrevoir, si sa production pouvait être maîtrisée, des développements considérables pour les bâtisseurs. C'est au milieu du 19^{ème} siècle que la structure du ciment fut vraiment découverte par le français Louis Vicat.

Le ciment est produit en portant à une température de 1450 °C un mélange de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs appelés clinker. Le clinker additionné de gypse est broyé très finement pour obtenir le ciment "Portland". L'ajout au clinker, lors de son broyage, d'autres éléments minéraux (laitiers de hauts fourneaux, cendres de centrales thermiques, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles ou artificielles) permet l'obtention des différentes catégories de ciments "avec ajouts". Mélangé à des granulats, du sable, des adjuvants et de l'eau, le ciment est l'élément de base indispensable pour la fabrication du béton, dont il est le composant actif. C'est pourquoi il est aujourd'hui l'élément essentiel et incontournable du secteur de la construction contemporaine et donc du monde moderne. [1]

I-2-Historique

- LES EGYPTIENS découvrent la chaux grasse, obtenue par cuisson de roches calcaires à une température proche de 1000°C, suivie d'une extinction avec de l'eau.
- LES ROMAINS ont fait véritablement du ciment en ajoutant à la chaux de la pouzzolane.
- LOUIS VICAT en 1817 élabore la théorie de l'hydraulicité, propriété jusque-là inexpliquée.
- En 1824, l'écossais ASPDIN donne le nom de PORTLAND au ciment qu'il fabrique dans cette région.
- LA PREMIERE USINE DE CIMENT à été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer.

I-3-Définition du ciment

Nous vivons avec le ciment. Quotidiennement. Le ciment est partout, élément basique, donc essentiel. Par l'extraordinaire diversité de ses usages, le ciment est le matériau du XXI^e siècle .donc qu'est ce que un ciment !

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit ...Le matériau formé est ensuite insoluble dans l'eau.

Le ciment est le constituant de base des bétons et des mortiers. Ce liant hydraulique artificiel permet de coller entre eux les grains de sable et les granulats.

Le ciment anhydre est constitué de clinker additionné de gypse ($\approx 5\%$), et éventuellement pour les ciments composés, d'autres constituants minéraux : laitiers, cendres volantes, fillers calcaires.

I-4-Etape de fabrication du ciment

Les ciments sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire et d'argile dans des proportions voisines de 80 % - 20 %.

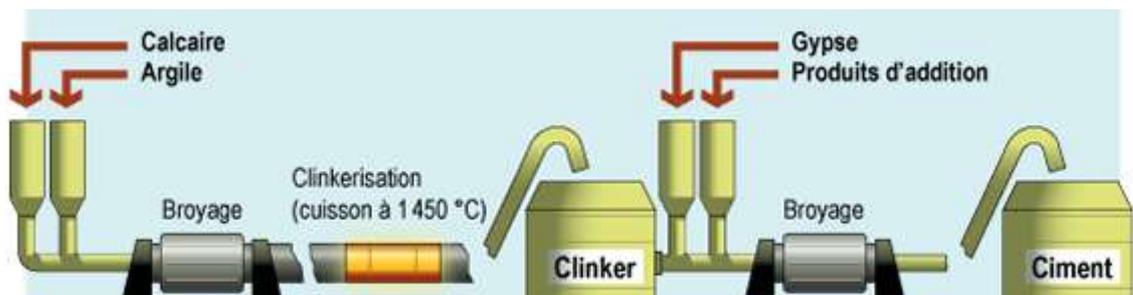


Figure (I-1): Schéma général du processus de fabrication du ciment [2].

Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, d'oxyde de fer ou d'autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis. Avant d'arriver aux produits finis que sont les différents types de ciments, le mélange de départ va passer successivement par différentes phases durant lesquelles la matière va subir une transformation chimique et cristalline importante.

La fabrication du ciment consiste à préparer un mélange des matières premières de granulométrie définie, à le cuire jusqu'au seuil de fusion et à broyer le produit de cette cuisson en une poudre fine et réactive : le ciment. Globalement, on peut distinguer quatre étapes dans la fabrication du ciment :

I-4-1-Extraction et concassage des matières premières

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert.

Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits dans en éléments d'une dimension maximale de 50 mm. Ces concasseurs sont situés parfois sur les lieux même de l'extraction. [3]

I-4-2-Mélange et réduction en farine de la matière première

Lors de l'étape suivante, les différentes matières premières sont mélangées dans des proportions correspondant à la composition chimique optimale. Dans un broyeur à boulets ou à meules, la matière est simultanément séchée et réduite en poudre fine. A la sortie, on obtient la farine brute qui va être homogénéisée pour garantir une composition uniforme.

I-4-3-Transformation par cuisson de la farine en clinker

Le processus de cuisson à une température d'environ 1450 °C est l'opération principale de la fabrication du ciment.

A la sortie du four, la matière se présente sous forme de clinker incandescent qui sera rapidement refroidi à l'air.

On utilise comme combustible du charbon, de l'huile lourde, du gaz naturel, parfois avec appoint de matières de récupération, par exemple des solvants, des huiles usées ou de vieux pneus.

I-4-4-Mouture du clinker avec le gypse et les ajouts

Pour obtenir le matériau réactif recherché, le clinker est broyé dans une unité de broyage appropriée, avec une petite quantité de gypse (régulateur de prise). Suivant le type de ciment, on ajoute au clinker, lors de la mouture, des composants minéraux (calcaire, laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes). On obtient ainsi des ciments appelés ciments composés ou ciments de haut fourneau.

I-5-Les constituants du ciment**I-5-1-Le Clinker****Figure (I-2) : Clinker [4]**

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃). Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne ...). C'est le clinker qui par broyage en presque d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle d'un régulateur de prise, donne des « Portland » et confère aux ciments de ce groupe leurs propriétés caractéristiques. [5]

- $3 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \xrightarrow{1220 \text{ }^\circ\text{C}} 3 \text{ CaO}, \text{SiO}_2 \cdot \text{C}_3\text{S} \cdot \text{Alite}$
- $2 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \xrightarrow{1220 \text{ }^\circ\text{C}} 2 \text{ CaO}, \text{SiO}_2 \cdot \text{C}_2\text{S} \cdot \text{Bélite}$
- $3 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \xrightarrow{1450 \text{ }^\circ\text{C}} 3 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{C}_3\text{A} \cdot \text{Célite}$
- $4 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \xrightarrow{1450 \text{ }^\circ\text{C}} 4 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{C}_4\text{AF} \cdot \text{Félite}$

Tableau (I-1): composition minéralogique moyenne du clinker. [6]

Minéral	Alite	Bélite	Célite	Félite
Proportion en masse (%)	60-65	10-20	8-12	8-10

Lors du broyage du clinker, une petite quantité de sulfate de calcium est ajoutée sous forme de gypse, d'hémihydrate ou d'anhydrite afin de contrôler (réguler) la prise du ciment.

Les minéraux des clinkers industriels admettent des éléments étrangers dans leur réseau cristallin (Cr, Ti, Sr, ...) ce qui modifie leur composition, leur structure ainsi que leur réactivité. Les variétés impures du silicate tricalcique et du bicalcique sont appelées respectivement « alite » et « belite ». A la sortie du four, le clinker se présente sous forme de boules d'un diamètre de l'ordre du centimètre.

❖ *Silicate tricalcique (C₃S)*

Cette phase constitue le composé principal du ciment (50 à 70%). Les cimentiers la désignent par le mot alite qui est une forme impure de C₃S. En effet, le C₃S contient soit en substitution des ions Ca ou Si, soit en insertion dans le réseau cristallin des traces de Mg, Al et Fe. Ces impuretés améliorent généralement la réactivité du ciment. La teneur en impureté du C₃S dépend, entre autres, de la nature des matières premières, de la température de cuisson et de mode de refroidissement du clinker. Il est bon de souligner que l'alite confère essentiellement sa résistance au ciment, en particulier à court terme.[7]

❖ *Silicate bicalcique (C₂S)*

Le C₂S constitue entre 15 et 30% du ciment Portland. Les cimentiers le désignent par bélite qui est une forme impure de C₂S. Dans le C₂S, on retrouve, en plus du potassium, les mêmes ions étrangers que dans le C₃S, mais ils y sont en plus grande quantité. La bélite fournit au ciment sa résistance à long terme.

❖ *Aluminate tricalcique (C₃A)*

Le C₃A, qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante. Dans les clinkers, la présence d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C₃A. Ainsi, selon la quantité totale d'alcalis dissous dans le réseau cristallin, le C₃A peut être cubique, orthorhombique ou monoclinique. Généralement dans le ciment, le C₃A est toutefois un mélange des formes cubique et orthorhombique, mais rarement monoclinique. Le C₃A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C₃A cubique.

❖ *Aluminoferrite tétra calcique (C₄AF)*

Le C₄AF représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland. Les formes C₆A₂F et C₄AF sont les plus couramment rencontrées dans le ciment. La réactivité de l'aluminoferrite tétracalcique dans l'eau est modérée et elle augmente avec la teneur en alumine. Les phases C₃A et C₄AF sont liquides à la température de formation du clinker, et elles constituent au cours du refroidissement, une phase interstitielle qui cristallise entre les cristaux de C₃S et C₂S.

I-5-2-Le Gypse (CaSO₄)

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. [8]

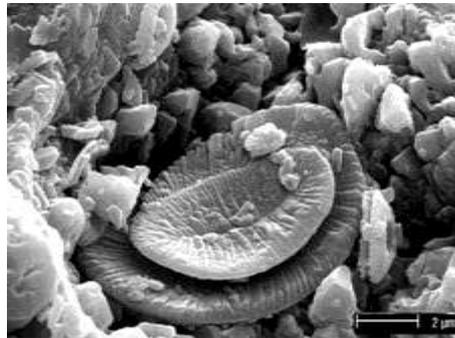


Figure (I-3) : image de gypse par le MEB [9]

I-5-3-Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des éléments parfois important dans l'amélioration des caractéristiques mécanique, physique du ciment, et permettent de remplacer de 20 à 35% de la quantité du clinker.

I-6-Classification du ciment

I-6-1-A partir de leur composition

La nouvelle normalisation comporte cinq types principaux de ciments : [10]

- Type I → Ciment Portland.
- Type II → Ciment Portland composé.
- Type III → Ciment de haut fourneau.
- Type IV → Ciment Pouzzolanique.
- Type V → ciment au Laitier et aux cendres.

Tableau (I-2) : Les 5 types de ciments courants et leur composition. [11]

	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CEM I	95 - 100	--	0 - 5
Ciment Portland composé	CEM II A	80 - 94	6 - 20	--
	CEM II B	65 - 79	21 - 35	--
Ciment de haut fourneau	CEM III A	35 - 64	36 - 65	0 - 5
	CEM III B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
	CEM III C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
Ciment pouzzolanique	CEM IV A	65 - 90	10 - 35	0 - 5
	CEM IV B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
Ciment composé	CEM V A	40 - 64	18 - 30	0 - 5
	CEM V B	20 - 39	31 - 50	0 - 5

I-6-2-A partir de leur classe de résistance

- **Définition des classes de résistance**

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa (1 MPa = 1 N/mm² = 10 bars). Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau suivant.

(Tableau I-3) : la résistance de chaque classe à la compression. [12]

Désignation de la classe de résistance	Résistance de la compression (en MPa)			
	Résistance a court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32.5 N	-	≥16	≥32.5	52.5
32.5 R.	≥10	-		
42.5 N	≥10	-	≥42.5	≤62.5
42.5 R	≥20	-		
52.5 N	≥20	-	≥52.5	-
52.5 R	≥30	-	≥52.5	-

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

I-7-Conclusion

L'industrie cimentière commercialise de nombreux type de ciment afin de répondre aux différent problèmes rencontrés lors de la construction d'ouvrages, qu'il s'agisse de résister à certaines attaques physique ou chimique, de présenter des caractéristiques compatible avec les contraintes appliquées ou encore pour tenir compte de mises en œuvre particulières.

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 [13].

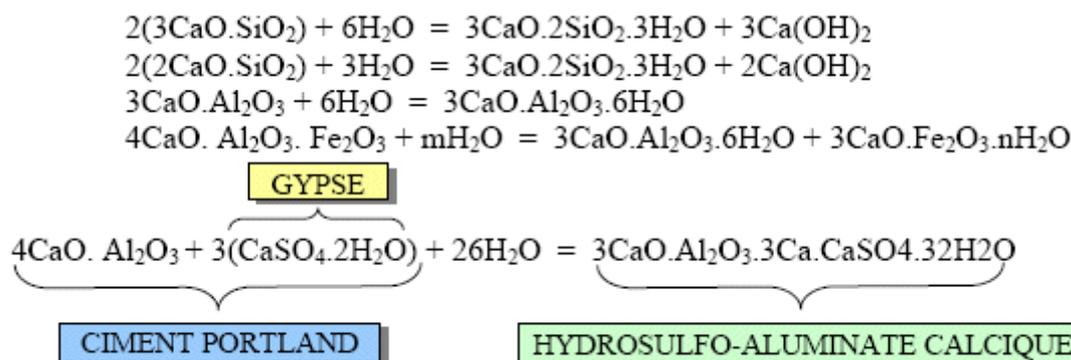
II-2- Réactions d'hydratation

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes.

$2\text{CaO}, \text{SiO}_2 - 3\text{CaO}, \text{SiO}_2 - 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 - 4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Les 4 principaux constituants anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates et aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau.

- *Principales réactions avec l'eau.* [14]



II-3-Hydratation du ciment portland

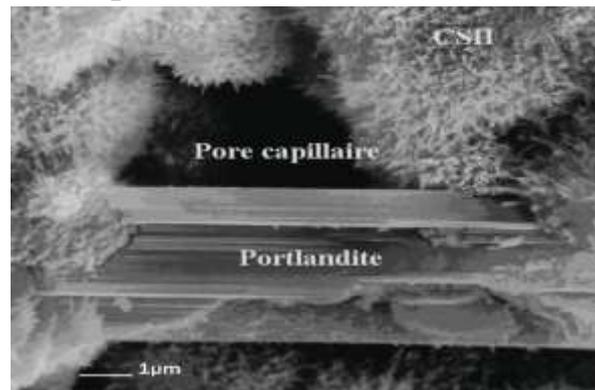


Figure (II -1) : Image en MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite [15].

Lorsque l'on ajoute de l'eau à du ciment, on obtient un fluide qui se transforme assez rapidement en une masse durcie. Cette transformation est obtenue grâce à l'hydratation du ciment. Ainsi, l'hydratation est un ensemble de réactions chimiques qui interviennent dès le début de gâchage et qui se poursuivent dans le temps, pendant plusieurs mois.

Les deux premières théories de l'hydratation du ciment datent de la fin du siècle dernier [16]. Elles ont été proposées par Le Chatelier (1887)[17] et Michaelis (1893)[18].

D'après la théorie cristalloïdale de Le Chatelier ou théorie de la dissolution-cristallisation, le ciment mis en présence d'eau donne naissance à une solution sursaturée. Les composés anhydres se dissolvent puis les hydrates formés, peu solubles, précipitent sous forme de microcristaux, ce qui permet une nouvelle dissolution d'éléments anhydres. Les réactions se poursuivent jusqu'à la mise en solution de la totalité du liant. Le durcissement est alors dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

Michaelis, quant à lui, suggère une théorie dite topo-chimique. Selon lui, il se produit d'abord un phénomène de dissolution provoquant un gonflement des grains et l'apparition d'une solution très concentrée en chaux. Cette solution agit sur les silicates pour donner un gel de silice et de chaux qui augmente peu à peu de volume en absorbant continuellement l'eau et la chaux. Le gel durcit, devient imperméable et l'hydratation se poursuit à l'intérieur des grains de ciment protégés par cette enveloppe.

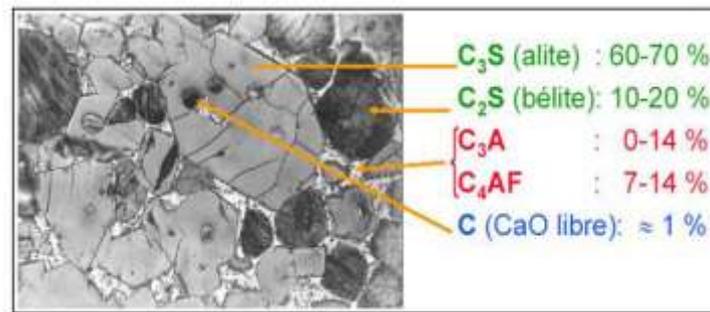


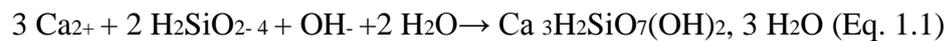
Figure (II-2):Micrographie de clinker montrant ses principales phases cristallines. [19]

II-3-1-Hydratation du silicate tricalcique

Au contact de l'eau, le silicate tricalcique se dissout superficiellement en libérant des ions silicates H_2SiO_2 , des ions hydroxydes OH^- et des ions calcium Ca^{2+} dans la solution [13].

Selon Regourd [20], l'hydratation du C_3S conduit à la formation de trois produits distincts :

- Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) suivant la réaction :



C'est la phase principale de la pâte de ciment hydraté. Elle forme avec l'eau un gel peu ou pas cristallin. Sa composition chimique est variable et le rapport CaO/SiO_2 peut s'écarter de la composition stoechiométrique en fonction de la composition de la solution mère qui beigne l'hydrate [21].

- L'hydrate de chaux : la portlandite $Ca(OH)_2$.
- Un silicate calcique hydraté : la tobermorite.

II-3-2-Hydratation du silicate bicalcique (βC_2S)

Le silicate bicalcique se comporte comme le silicate tricalcique en donnant des C-S-H semblables avec une certaine différence dans la microstructure. Cependant, les principales différences résident dans l'absence d'une sursaturation marquée en portlandite et dans un flux de libération de chaleur plus faible. Si le degré de sursaturation est en relation avec la germination de la portlandite, la faible sursaturation est en relation avec la germination de la portlandite, la faible sursaturation autour des grains de βC_2S peut expliquer sa réactivité moins importante par rapport à celle du C_3S au jeune âge.

II-3-3-Hydratation de l'aluminate tricalcique (C_3A)

Les études portant sur l'hydratation du C_3A montrent clairement l'influence de cette réaction sur le comportement rhéologique initial du ciment. Contrairement aux phases silicatées, le sulfate de calcium joue un rôle crucial sur l'hydratation du C_3A et les hydrates formés sont différents (morphologie, structure, composition) selon que le processus d'hydratation a lieu en

absence ou en présence de « gypse ».

En absence de « gypse », une réaction accélérée se produit et conduit à la formation d'aluminates hydratés hexagonaux suivant la réaction :



Ces hydrates hexagonaux ne sont pas stables et se transforment au cours du temps sous l'action de la chaleur d'hydratation du C3A en hydrate cubique C3AH6, plus stable, suivant la réaction :



Ces réactions sont la cause principale de la prise rapide des ciments Portland lorsque la quantité de « gypse » présente dans le ciment est insuffisante. Pour prévenir ce phénomène et contrôler la prise, le « gypse » est broyé avec le clinker pour donner le ciment Portland. Au lieu d'une réaction accélérée, il se produit une réaction lente à cinétique variable, similaire à celle du C3S, mais avec une durée plus longue. Pliskin [13] distingue les phases suivantes durant le déroulement de l'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence de sulfate de calcium.

II-3-4- Hydratation de l'aluminoferrite de calcium (C4AF)

L'hydratation du C4AF est similaire à celle du C3A. Cependant, le C4AF réagit moins vite que le C3A. Son hydratation n'est toujours pas totalement élucidée et est souvent ignorée dans les publications portant sur l'hydratation des ciments. Les réactions mises en jeu lors de l'hydratation sont les suivantes :

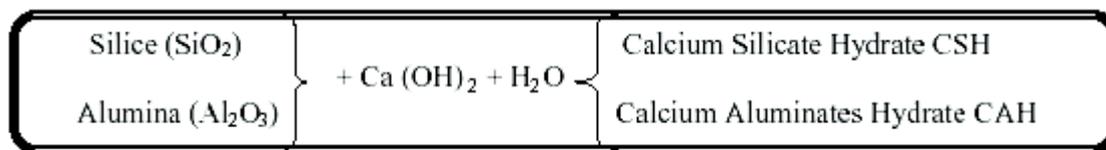
- Sans gypse : $\text{C}_4\text{AF} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4(\text{AF})\text{H}_{13}$ (Eq. 1.6)
- Avec gypse : $\text{C}_4\text{AF} + \text{gypse} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4(\text{AF})\text{SH}_{12}$ (Eq. 1.7)

Après l'épuisement du « gypse », un composé dérivé du MSA se forme dans lequel un atome de fer s'est substitué à un atome d'aluminium.

II-4-Les réactions pouzzolaniques

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique 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 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 SiO2 de la pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca(OH)2 créée par l'hydratation du ciment portland [22]. 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, C4AH13, C8AFH26, C6AS3H32). 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. [23]



II-5- 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 [24].

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 (SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO) et contenant en quantité insignifiante des oxydes. TiO₂, MnO, FeO et les sulfures. CaS, MnS, FeS. 63 le laitier pendant l'hydratation en présence d'eau a le pouvoir de former un gel stable (SHC).

II-6-Conclusion

L'hydratation du ciment est un ensemble de processus chimiques qui conduisent à la transformation de phases anhydres en différentes phases hydratées. Ces transformations chimiques s'accompagnent d'un ensemble de processus physiques qui participent à la construction de la microstructure de la pâte de ciment et de gérer les performances mécaniques.

Les ajouts minéraux

III-1-Introduction

Le ciment se classe au monde de la construction dans les rangs pilote de tous les matériaux grâce à ses multiples avantages, mais ça n'empêche de dénombrer certains inconvénients notamment environnementale, selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine et civile

Parmi les solutions qui ont montré une efficacité à l'encontre de cet inconvénient l'incorporation de certains déchets minéraux pour la fabrication des ciments, l'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays.

L'industrie du ciment et du béton s'est intéressée à cette nouvelle orientation en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton [25]. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention de ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles de ciment CEM I pour un moindre coût. En second lieu, les ciments composés présentent souvent l'avantage d'une meilleure résistance aux agressions chimiques [26].

III-2-Définition des ajouts minéraux

Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Il existe deux types d'additions:

- les additions quasi-inertes (de type I)
- les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (de type II)

III-3-Classification des ajouts minéraux

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs.

III-3-1-Principaux ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière. [27]

III-3-1-1-Fillers Calcaires (L)

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns. [28]

Les fillers calcaires se différencient les uns des autres par :

Leur origine, leur compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent. Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.

Leur dureté, leur porosité. [29]

- ***Influence sur les caractéristiques des bétons frais***

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports $E/C < 0,40$. Il est important de signaler que la présence de fines d'argile dans le filler peut augmenter la demande en eau.

(Alexander, 1972 cité par [30]) rapporte que l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m^2/kg . Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

Il est à noter que la présence du filler calcaire peut augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.

Le filler calcaire peut également contribuer au contrôle du temps de prise par la formation de carboaluminate de calcium (structure similaire à celle du monosulfoaluminate).

- ***Influence sur les caractéristiques des bétons durcis***

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de monocarboaluminates et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation.

Les auteurs rapportent qu'avec le filler calcaire, il y a une augmentation des résistances mécaniques au jeune âge due à l'effet accélérateur et à l'effet filler du calcaire. On note que pour une finesse de 300 à 350 m^2/kg , il y a seulement l'effet filler.

III-3-1-2-Schistes calcinés

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont thermiquement activés. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

III-3-2-Principaux ajouts minéraux actifs

III-3-2-1-Le laitier granulé de haut fourneau (S)



Figure (III-1) : Laitier [31]

Le laitier granulé est obtenu par refroidissement rapide de scorie fondue provenant de la fusion du minéral de fer dans un haut fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment. [32]

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500°C. figé par refroidissement brusque il donne un produit granulé. il contient de chaux (45 à 50 %), de la silice (25, à 30%), de l'alumine (15 à 20 %), et de 10% environ de magnésie, oxyde divers et manganèse. [33]

Le laitier du haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour sa qualité.

C'est un sous produit dans la production du fer dans les hauts fourneaux, présentant des caractéristiques et des propriétés que l'on a appris à connaître de mieux en mieux, et la voie a été ouverte à d'assez nombreuses utilisations.

En Algérie, l'utilisation du laitier granulé en cimenterie comme ajout ne dépasse pas

20 % (en remplacement du ciment portland). Le reste du laitier s'entasse en crassier, occupant des surfaces immenses de terres fertiles, sans considérables applications ; une telle production du laitier (granulé ou cristallisé) reflète d'immenses possibilités de son utilisation dans le domaine des matériaux de construction et des travaux routiers (comme ciment, granulats fins où granulats grossiers), afin de protéger l'environnement des stocks grandissants des résidus industriels, et de ne pas épuiser les sources naturelles (matières premières pour la fabrication des ciments et les réserves des granulats). Et enfin de réaliser le rêve de plus de la moitié de la population.

Tableau (III-1) : Composition chimique du laitier et du ciment portland.

[34]

Elements chimiques %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
Laitier	38-44	34-39	08-14	06-10
Ciment portland	64-66	19-22	05-22	01-1.5

- ***Influence sur les caractéristiques des bétons frais***

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton

conventionnel. Manai [25] explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement intergranulaire

dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

Venuat [35] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Ainsi les chercheurs trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type du laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton.

- ***Influence sur les caractéristiques des bétons durcis***

Selon Venuat [35], les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Venuat rapporte aussi que les laitiers permettent de réaliser des bétons résistant à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète. Les mortiers aux laitiers sont de 10 à 100 fois moins perméable à l'eau que les mortiers de ciment portland. Un remplacement de 10% du ciment par le laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition. Les chercheurs rapportent l'effet bénéfique des bétons aux laitiers sur la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité, à la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminat. Les réactions alcalis-silice décroissent avec l'augmentation de la teneur en laitier due à la fixation par ce dernier des ions sodium. Quant à la résistance aux cycles de gel-dégel, presque tous les auteurs sont d'accord que les bétons avec et sans laitier se comportent de la même façon.

III-3-2-2-La pouzzolane naturelle ou artificielle (Z)

Ce sont des produits naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. [36]

✓ *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 Algérie coté ouest du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

✓ *Pouzzolane artificielle*

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées 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 la schiste cuite, et les déchets de l'industrie a base de méta kaolinite.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories :

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes. [37]

✓ *Effet de La pouzzolane*

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

✓ *A l'état frais*

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

✓ A l'état durci

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

✓ Propriété de la pouzzolane

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

✓ Propriétés hydrauliques

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

✓ *Propriétés physiques de remplissage*

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.[38]

III-3-2-3-Les cendres volantes siliceuses ou calciques

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentés au charbon pulvérisé.

III-3-2-4-La fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 µm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

Tableau (III-2) : l'effet d'ajouts sur le ciment. [3]

Type d'ajout	Réaction Chimique	Effet ↑ = Augmentation ↓ = Diminution	Ajouts
Inerte	Aucune réaction, ou tout au plus réactions superficielles	↑ Ouvrabilité ↓ Porosité (effet de remplissage)	Additions calcaires Additions siliceuses
Pouzzolanique	Réaction avec l'hydroxyde de calcium et l'eau : formation de substances analogues aux hydrates du ciment	↑ Ouvrabilité ↓ Porosité ↑ Durabilité ↓ Chaleur d'hydratation ↓ Résistance initiale ↑ Résistance finale	Cendres volantes siliceuses Fumée de silice Pouzzolanes naturelles
Hydraulicité latente	En présence d'activateurs (alcalins, chaux, sulfates) et d'eau : formation de substances analogues aux hydrates de ciment	↓ Porosité ↑ Durabilité ↓ Chaleur d'hydratation ↓ Résistance initiale ↑ Résistance finale	Laitier granulé de haut fourneau (séché et broyé)

III-4-Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

III-4-1-Intérêt du point de vue technique

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). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [39].

III-4-2-Intérêt du point de vue économique

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [39]

III-4-3-Intérêt du point de vue environnemental

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂. [40]

III-5-L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement.

Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El - Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni - Saf.

Tableau (III-3) : L'utilisation des ajouts en Algérie [41]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

III-6-Influence des ajouts sur les performances mécaniques

*Mohamed salhi , cherici [42] ont étudié l' Influence des ajouts minéraux sur la durabilité des mortiers qui contient le laitier de d'ElHadjar et la pouzzolane naturelle de BéniSaf, conservés dans trois milieux de conservation (eau douce, eau de mer, sulfate de magnésium + chlorure de sodium "3% MgSO₄ + 19,6% NaCl"). Ils constatent que l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de tous les mortiers utilisés conservés dans l'eau douce augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute jusqu'à l'âge de 270 jours. Ainsi, nous remarquons que la résistance à la compression est maximale dans le ciment au laitier L40 à l'âge de 270 jours. A 28 jours la résistance du ciment CEMI dépasse les autres liants. donc les résultats qui trouvent sont :

-la substitution de 40 % de laitier dans un ciment Portland améliore la résistance à la compression à long terme.

-le laitier d'El hadjar améliore la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques des sulfates. Cette amélioration se traduit par une faible intensité d'ettringite.

-l'ajout des matériaux pouzzolanique permet de réduire l'effet des attaques chimiques par la réduction de la perméabilité du matériau, de la taille des pores et du pourcentage de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

*Mokhtaria BENKADDOUR, Fatiha KAZI AOUAL [43] ont étudié l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (gisement de Bouhmidi) et la pouzzolane artificielle à base de la vase calcinée de barrage Ferrgoug (Mascara) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés. Pour cela, Elles ont comparé le comportement des mortiers élaborés à base de ciment seul (CPA 42.5) et celui des mortiers contenant différents dosages de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. Elles constatent que :

Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.

La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2j, 7j et 28 jours. A titre d'exemple, un remplacement du ciment par 30% de PA (la vase calcinée) diminue la résistance à la compression de 41.68% 26.31% et 19.74% à 2j,7j et 28 jours respectivement ;aussi la substitution de 30% de PN diminue la résistance à la compression de 36.68%,6.16% et 24.45% à 2j,7j et 28 jours respectivement ;Ces résultats sont prouvés par (Ghrici et al ,2005) et (Boumediene, 1999). La résistance à la compression de 10PA et de 10PN rejoint celle du T à 28 jours, nous recommandons de comparer leurs comportements à plus long terme.

La différence de la résistance à la compression des mortiers qui contiennent de 10% à 30% de la pouzzolane naturelle et ceux qui contiennent de 10% à 30% de la vase calcinée ne dépasse pas 5% quelque soit l'âge.

III-7-Influences des ajouts vis-à-vis des attaques acides

* Yassine SENHADJI1, Mohamed MOULI2, AbdelHamid. KHELAFI1, Ahmed Soufiane BENOSMAN3 [44] ont étudié La résistance du mortier aux attaques acides pour une même concentration de 5% pour l'ensemble des milieux acides (HCl et H_2SO_4 , CH_3COOH), ils sont comparé entre ciment CPA Zahana avec 15 et 30% de pouzzolane Beni-saf et ciment CPA sans ajout. Ils constatent que :

-Après 28 jours d'immersion, la perte en poids du ciment CPA Zahana avec 15% de pouzzolane diminue de 2.5%, 5.4% et 0.2% par rapport au ciment CPA sans ajout pour les solutions respectivement 5% HCl, 5% H₂SO₄ et 5% CH₃COOH

-Dans le cas du ciment CPA + 30% PZ, elle diminue de 3%, 10% et 0.5%, respectivement pour les solutions 5% HCl, 5% H₂SO₄ et 5% CH₃COOH.

III-8-Rôle des additions minérales vis-à-vis de la carbonatation

D'une façon générale les ajouts de laitiers et de cendres volantes dans le béton accroissent la carbonatation par rapport à un béton de CPA. La vitesse et le degré d'hydratation des bétons contenant du laitier ou des cendres volantes sont davantage affectés par les conditions et la durée de la cure. C'est notamment le cas des bétons contenant de la fumée de silice qui sont plus sensibles à la carbonatation que les bétons de CPA lorsque les conditions de la cure sont médiocres.

Vis-à-vis de la carbonatation les bétons de CPJ aux fillers calcaires se comportent de façon comparable aux bétons de CPA ayant la même classe de résistance. [45]

III-9-Durabilité d'un béton dans un milieu sulfatique

Les sulfates représentent les risques majeurs d'agression chimique pour le béton. Ils peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques ou industrielles. Ils sont présents dans les sols en faible concentration de 0,01 à 0,05 %. Des valeurs beaucoup plus élevées peuvent être rencontrées dans les régions dont le sous-sol est riche en gypse (CaSO₄·2H₂O) ou de l'anhydrite (CaSO₄), cas de l'Algérie.

III-10-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, 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 et la durabilité des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité.

La durabilité

IV-1-Introduction

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions aux sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme.

Il doit satisfaire d'une manière permanente, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

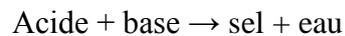
La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Les ciments actuels répondent aux exigences des emplois usuels ; les milieux qui présentent des agressions spécifiques nécessitent le recours à des ciments présentant une caractéristique particulière du fait de leur composition. C'est ainsi qu'en présence d'un facteur agressif pouvant entraîner la dissolution de la portlandite (par exemple l'eau pure), on préférera des ciments conduisant à une faible teneur en portlandite. Vis-à-vis des agressions dues aux milieux marins ou aux eaux sulfatées, on utilisera respectivement des ciments prise mer (PM) ou résistant aux eaux sulfatées (ES).

En dehors des effets liés à des phénomènes proprement physiques (carbonatation, alcali-réaction, corrosion), le béton est soumis à des agents chimiquement agressifs dont le vecteur commun est l'eau. Les ouvrages en béton sont exposés à la pluie, à la neige, aux eaux souterraines, à l'eau de mer et à toutes solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz. Les bétons sont des solides poreux qui ont un caractère basique dû à la nature de la pâte durcie qui renferme :

- 15 à 20 (%) de portlandite (base forte) .
- environ 70 (%) de CSH qui peut être considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte $[Ca(OH)_2]$.
- 10 à 15 (%) d'aluminates et sulfoaluminates de calcium hydratés.
- une solution interstitielle dans les pores et les capillaires, enrichie en alcalins $[Na(OH)$ et $KOH]$ dont le pH varie de 12,5 à 13,5.

Or sauf cas exceptionnel, le pH du milieu est inférieur au pH du béton, il en résulte que le système chimique que représente la matrice cimentaire du béton est en déséquilibre avec le milieu. La réaction chimique peut s'écrire de façon simple :



Cette réaction est préjudiciable à la bonne tenue du béton si le sel formé est dénué de propriétés mécaniques, ou expansives, ou s'il est soluble.

Les observations des ouvrages ont montrés que par ordre d'importance décroissante, les causes suivantes de détérioration du béton sont :

1. corrosion des armatures suite à la contamination par les chlorures.
2. action du gel dans les climats froids.
3. Eaux agressives chargées en dioxyde de carbone, sulfates ou chlorures.

Cependant, un béton correctement formulé et soigneusement mis en oeuvre, sera très peu poreux, par conséquent peu accessible aux fluides. Concrètement, lorsque le pH est supérieur à 6, un bon béton peut subir des altérations tolérables au cours de la durée de vie pour laquelle il a été conçu. [45]

IV-2-les types d'agents agressifs

❖ agents agressif gazeux

Le transfert des gaz dans le béton se fait généralement par diffusion et dépend très fortement de l'humidité relative du matériau. Les transferts par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide et en phase gazeuse.

❖ Agents agressifs liquides

Le transfert de liquide se fait soit par mouvement du liquide sous gradient de pression hydraulique ou par capillarité d'une part, soit par diffusion d'autre part. L'écoulement ou le mouvement du liquide se produit lorsque le béton est soumis à un gradient de pression hydraulique (barrage). L'écoulement en phase liquide est engendré par les tensions capillaires ou encore lorsque le béton est sec subit une ascension capillaire d'eau d'origine extérieure.

❖ Agents agressifs solides

La nocivité des substances solides est directement liée à leur capacité d'extraction et de passage en solution dans les eaux avec lesquelles ils entrent en contact. Leurs actions se réduisent alors à des phénomènes voisins de ceux observés dans le cas des agressions par les liquides.

IV-3- facteur de la durabilité

IV-3-1-Introduction

Les transferts dans le béton durci s'établissent par l'intermédiaire :

- d'un réseau de fissures, qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé et éventuellement de diverses causes accidentelles.
- réseau poreux, qui apparaît normalement dans la structuration de la pâte au cours de l'hydratation

IV-3-2- La fissuration

La fissuration du béton armé est normale lorsqu'elle est maîtrisée, ce qui signifie que les fissures sont d'ouverture limitée.

En fonctionnement normal, les éléments du béton armé qui travaillent en traction ou en flexion sont fissurés. Les formules de calcul des structures permettent d'estimer l'ouverture et l'espacement des fissures, on dispose aussi de règles fixant la limite admissible d'ouverture des fissures en fonction de l'agressivité du milieu.

Les causes générales de la fissuration précoce auxquelles nous nous intéressons ici sont les causes physiques. Ces causes sont d'une part le tassement qui accompagne le ressuage et d'autre part les retraits (chimique, thermique et hydrique).

IV-3-3-La porosité

La durabilité du béton dépend essentiellement de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du matériau. La porosité est un paramètre déterminant de la durabilité du béton, plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue.

IV-3-4-la perméabilité

La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser pénétrer et traverser par un fluide (eau, air, ou un autre gaz...) elle est directement liée aux caractéristique du réseau poreux (forme, dimension, distribution, etc ...) la perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation. [46]

IV-4- Les pathologies du béton

IV-4-1- La Carbonatation

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO₂) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se

combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH, NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :

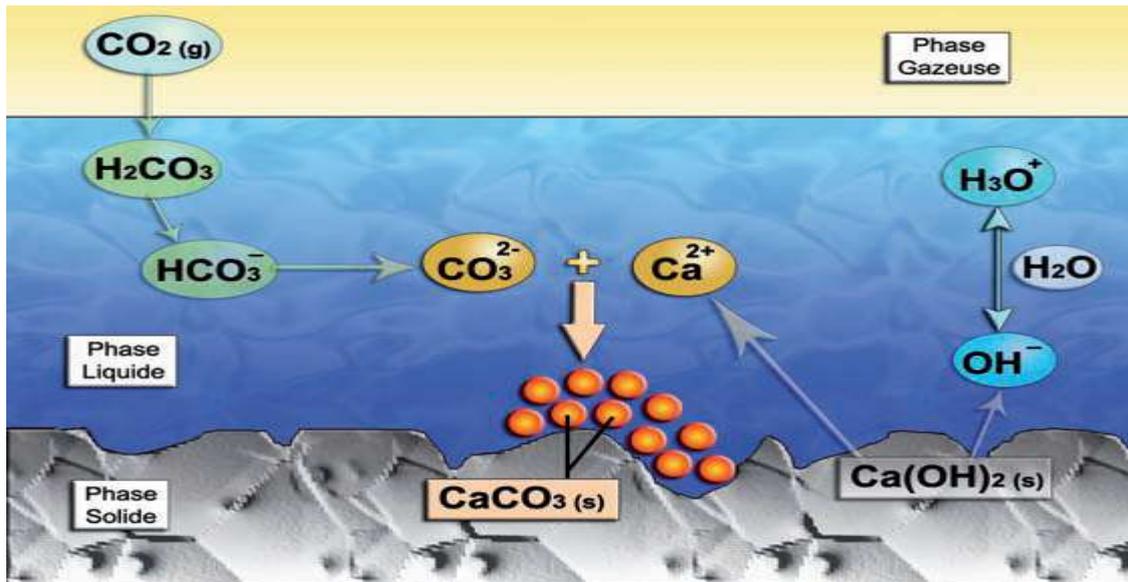


Figure (IV-1) : Mécanisme de carbonatation au niveau de la solution interstitielle du béton [47]

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures. [48]

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

IV-4-2-La corrosion des armatures

IV-4-2-1-Introduction

Dans le béton armé et précontraint, la durabilité est assurée par la matrice cimentaire qui protège physiquement et chimiquement l'acier de la corrosion. La solution interstitielle de la pâte de ciment est à caractère basique, son pH est de l'ordre de 13, ce qui confère une stabilité aux armatures noyées dans le béton.

Deux processus peuvent altérer la protection assurée par le béton :

- ❖ diminution du pH de la phase aqueuse interstitielle par action principalement du dioxyde de carbone de l'air (par carbonatation du béton).
- ❖ pénétration d'agents agressifs, notamment les ions chlorures jusqu'au niveau des armatures (par action des chlorures).

Ces deux processus d'altération sont régis par deux facteurs essentiels :

- la qualité du béton : sa porosité.
- l'épaisseur de recouvrement des armatures « l'enrobage ».

D'autres facteurs peuvent contribuer à la protection des armatures :

- la cure humide qui a une importance particulière, notamment sur l'enrobage qui est très sensible à la dessiccation.
- la limitation des ions chlorures dans les ciments, les granulats et les adjuvants.
- la fixation d'une épaisseur minimale d'enrobage : les codes de calcul fixent une épaisseur minimale d'enrobage qui dépend de la classe d'environnement.
- la limitation de l'ouverture de fissures du béton armé : les codes de calcul donnent les règles pour limiter l'ouverture des fissures du béton armé, qui dépendent de l'agressivité du milieu et du caractère plus ou moins préjudiciable de la fissuration (peu nuisible, préjudiciable, très préjudiciable).

IV-4-2-2-Généralités

La corrosion des métaux est définie comme le phénomène d'oxydation du métal lors de son interaction chimique, électrochimique ou biochimique avec le milieu ambiant. Elle correspond à une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement qui implique une "consommation" du matériau ou la dissolution dans ce matériau d'une composante de l'environnement. La corrosion des métaux est basée sur le principe suivant : « toute cause qui tend à déplacer l'équilibre en favorisant la mise en solution du métal sous forme d'ions engendre la corrosion ». [49]

Les aciers non alliés ont une constitution atomique instable qui permet aux atomes périphériques, dès que le métal (Fe) est plongé dans une solution électrolytique, de passer en solution sous forme d'ions Fe^{z+} selon la réaction de l'équation (**Eq. I.1**), les électrons restant à la surface du métal : $Fe \rightarrow Fe^{z+} + ze^{-}$ (Eq. I.1).

IV-4-2-3-Influence du pH sur la corrosion

La corrosion se propage pour un pH de l'ordre de 11 pour un béton carbonaté et s'accroît lorsque le pH diminue. En présence de chlorures, elle a lieu même en milieu très basique autour d'un pH de 12.

IV-4-2-4-Effets de la corrosion

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

IV-5-Phénomène de Lixiviation

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres. Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs. [48]

IV-6-Phénomène d'alcali-réaction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na₂O et oxyde de potassium K₂O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

Il s'agit de réactions internes au béton mettant en jeu essentiellement les éléments présents à l'origine dans le béton et un apport d'eau externe. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages les plus sévèrement exposées à l'humidité, en général au bout de quelques années (voire plusieurs dizaines d'années). On observe la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un décollement à l'interface pâte-granulats et la formation de microfissures à l'interface béton armatures qui se matérialisent en surface par une fissuration orientée selon la direction des aciers.

Le phénomène d'alcali-réaction est depuis plusieurs années parfaitement maîtrisé, il est maintenant possible de prévenir tout risque d'alcali réaction dans les bétons et éviter tout désordre.

IV-7-Mécanisme d'action

IV-7-1-Action des milieux acides

Les milieux acides correspondent à plusieurs types de situations, dont les plus fréquentes sont :

- eaux naturelles des marécages
- eaux industrielles (industries chimiques, agroalimentaires)
- eaux d'égouts

L'action des milieux acides est identique dans le mécanisme de dégradation que les eaux pures et eaux douces, mais elle est plus intense : la portlandite est dissoute en premier ; puis les silicates et aluminates de calcium hydratés sont attaqués et perdent leur calcium.

La nocivité des acides dépend du caractère soluble ou insoluble des sels qui se forment par

réaction avec les hydrates calciques. Par exemple l'acide phosphorique car il donne des phosphates de calcium insolubles est moins dangereux que l'acide chlorhydrique générateur de chlorure de calcium très soluble.

Dans les réseaux d'égouts, l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par transformation de produits soufrés. C'est après qu'il soit combiné à l'humidité atmosphérique, puis condensé sous forme d'acide sulfurique sur les parois que le béton est agressé.

IV-7-1-1- action par sulfate de sodium

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite dite ettringite secondaire expansive, à distinguer de l'ettringite « primaire », obtenue lors de l'hydratation des ciments portland par réaction avec le gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite secondaire se déroule en deux étapes : Cela peut être résumé comme suit :

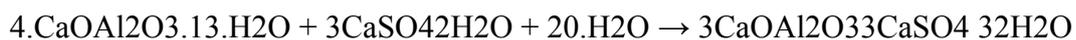
a - Formation du gypse secondaire : la formation du gypse dit « secondaire » par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate selon la relation : [45]



Gypse Secondaire Produit soluble

Une expansion peut se manifester mais dans la majorité des cas elle restera limitée dans la mesure où le gypse secondaire se forme selon un processus de dissolution et de cristallisation.

b - Formation de l'ettringite secondaire : la formation de l'ettringite secondaire peut résulter de la réaction chimique entre le gypse secondaire et les reliquats des aluminates de calcium anhydres (C3A) ou hydratés (C4AH13) ou du sulfoaluminate de calcium (C3A CaSO4H12) selon les relations suivantes:



Suivant la composition de la phase liquide, en particulier la teneur en chaux, la cristallisation de l'ettringite peut être expansive ou non .

Dans les produits riches en chaux, où sa solubilité est réduite .

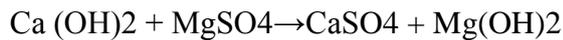
l'ettringite se forme topochemiquement par croissance cristalline, au contact des aluminates de

calcium en présence d'une solution fortement sursaturée. Cette ettringite est massive, mal cristallisée et expansive.

Dans les ciments qui libèrent moins de portlandite (CEMII et CEM III), l'ettringite précipite à partir de la solution et cristallise en aiguilles bien formées et n'est pas expansive.

IV-7-1-2 action par sulfate de magnésium

Le sulfate de magnésium est particulièrement agressif par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec le cation Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} selon les relations:



Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduisent à la formation de la brucite $Mg(OH)_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des CSH en un silicate de magnésium hydraté MSH sans propriétés liantes. De plus la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation du gypse secondaire.

IV-7-2-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. [50]

IV-7-3-Action de la température

La température joue un double rôle :

- de façon classique elle accélère la prise et le durcissement du ciment,
- elle intervient sur la cure du béton : l'apparition de fissures de retrait thermique pouvant être préjudiciables au béton et au béton armé,
- elle accélère au même titre les réactions chimiques de dégradation du béton.

IV-8-Paramètres de défense du béton dans un environnement sulfatique

a - comme pour la majorité des environnements agressifs, la perméabilité du béton demeure le facteur essentiel,

b - utiliser un ciment à faible teneur en C3A, est une précaution complémentaire, pour maintenir la durabilité du béton suffisante même si accidentellement le béton est plus poreux que prévu.

c - les additions minérales de laitier, de cendres volantes silico-alumineuses, de pouzzolanes naturelles et de fumées de silice, améliorent la résistance chimique des bétons à l'action des sulfates.

L'amélioration est due à la dilution des aluminates, la fixation de la portlandite et la modification de la structure des hydrates qui deviennent plus compacts au moins pour les bétons âgés et aux effets intrinsèques d'une addition minérale (de surface, physique, et chimique).

- réduction de la teneur en C3A et $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

- augmentation de la compacité du béton par effet de remplissage de l'addition jouant le rôle de granulats très fins d'abord et accroissement de la compacité des hydrates par effet chimique due à la réaction pouzzolanique qui se produit entre la portlandite libérée par l'hydratation des silicates de calcium et la silice apportée par l'addition.

- Modification de la microstructure des hydrates, en particulier la distribution dimensionnelle des pores qui se déplace vers les plus faibles rayons (cas des cendres volantes silico-alumineuses).

IV-9-Conclusion

Pour réaliser un béton durable, il suffit, dans la majorité des cas, de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact. Le respect d'exigences supplémentaires, notamment le choix du ciment, est nécessaire pour maîtriser des situations plus sévères, telle qu'une conservation en milieux agressifs.

D'une manière générale, on peut conclure que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges ainsi sur les propriétés physiques et microstructurales et contribuent à la durabilité des matériaux cimentaires durcis.

Plans d'expériences

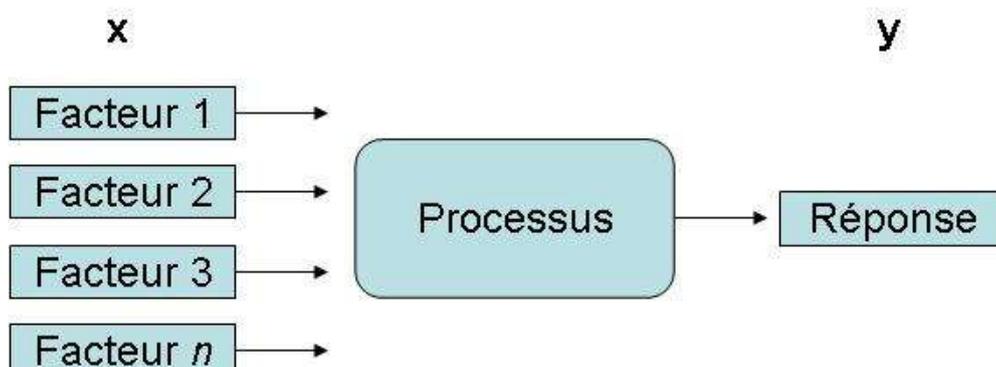
VI.1. Introduction

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 suivant résume de manière plus simple cette définition [51].



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 [52].

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.

- **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 [53]

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.

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

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).

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 linéaire***

Dans le cas des mélanges, on a toujours la relation suivante : $X_i = 1$ qui exprime la notion d'un mélange. De ce fait, le modèle linéaire prend sa forme de $Y = a_k X_k$. Ce modèle n'a pas de

constante. Pour $k=3$, on aura donc $Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3$. La résolution de cette équation nécessite alors trois mélanges chacun est situé au sommet du triangle représentatif du domaine expérimental. Et pour tester la validité du modèle, on effectue un autre essai au barycentre du triangle.

- **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.

- **Modèle spécial cubique**

Il s'agit cette fois d'un modèle de degré 3, ayant la forme générale suivante :

$$Y = a_m X_m + a_{ij} X_i X_j + a_{ijh} X_i X_j X_h \quad (i < j < h) \text{ et } m \text{ varie librement entre } 1 \text{ et } k.$$

Dans notre cas $k=3$, on a :

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 + a_{123} X_1 X_2 X_3$$

Dans ce cas, on a sept facteurs à déterminer donc il nous faut sept mélanges qui seront pris aux sommets, aux milieux des arrêts et au barycentre du domaine expérimental.

Pour tester la validité de ce modèle on effectue les six mélanges correspondant aux 1/3 et 2/3 de chaque arrêt. Ainsi, on aura au total 13 mélanges de ciments à réaliser.

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 $X_i \leq 1$. Ses contraintes sont fréquemment rencontrées. Si aucune contrainte n'est signalée sur une composition, il y a toujours la contrainte naturelle $X_i \leq 1$.
- **Plan de mélange de type III** : est tel que $\sum X_i = 1$. 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 : $X_3 = X_1^2$, $X_4 = X_2^2$, $X_5 = X_1 X_2$ [54].

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 »

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

Le logiciel Design-Expert permet la conception de stratégies expérimentales optimales, ainsi que l'élaboration des plans d'expériences et l'analyse de leurs résultats. Il s'adapte à tous

types de problèmes afin de répondre précisément aux objectifs tout en tenant compte des contraintes expérimentales.

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

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

Etude expérimentale

Appareil de Vicat
 Réf 114-2
 Réf. 9998 Appareil de Vicat manuel ES 114-2
 Pour la mesure du temps de prise par choc, mesure rapide et précise.
 Réf. 9999 Appareil de Vicat automatique ES 114-2
 Réglable, mesure précise.
 Réf. 9999 Appareil de Vicat automatique ES 114-2

Appareil de VICAT automatique
 Réf. 9999 - Fonctionne en 9001 automatique

Balance mobile en laque
 Réf. 115-1 Balance mobile en laque - Capacité 10 kg - Précision 1 g - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 115-2 Balance mobile en laque - Capacité 10 kg - Précision 1 g - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 115-3 Balance mobile en laque - Capacité 10 kg - Précision 1 g - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 115-4 Balance mobile en laque - Capacité 10 kg - Précision 1 g - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Flougeur central de ciment
 Réf. 116-1 Flougeur central de ciment - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 116-2 Flougeur central de ciment - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 116-3 Flougeur central de ciment - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Balance de précision
 Réf. 117-1 Balance de précision - Capacité 100 g - Précision 0,1 mg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 117-2 Balance de précision - Capacité 100 g - Précision 0,1 mg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 117-3 Balance de précision - Capacité 100 g - Précision 0,1 mg - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Appareil de mesure de la densité
 Réf. 118-1 Appareil de mesure de la densité - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 118-2 Appareil de mesure de la densité - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 118-3 Appareil de mesure de la densité - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Table à banc
 Réf. 119-1 Table à banc - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 119-2 Table à banc - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 119-3 Table à banc - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Balance - analyseur
 Réf. 120-1 Balance - analyseur - Capacité 100 g - Précision 0,1 mg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 120-2 Balance - analyseur - Capacité 100 g - Précision 0,1 mg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 120-3 Balance - analyseur - Capacité 100 g - Précision 0,1 mg - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Mélangeur
 Réf. 121-1 Mélangeur - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 121-2 Mélangeur - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.
 Réf. 121-3 Mélangeur - Capacité 10 kg - Pour la mesure de la densité des matériaux.

Préparation des matériaux utilisés

I-1-Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans cette étude. Les matériaux utilisés dans la formulation des mortiers et des pâtes pour tous les modèles expérimentaux sont :

-Pour le ciment : on prépare les composants du ciment qui sont : le clinker, le gypse, les ajouts (calcaire, pouzzolane, laitier).

-Préparation de deux milieux agressifs.

I-2-préparation du ciment utilisé

Dans cette partie nous exposons le mode les étapes et les différents matériaux de base utilisés pour la préparation du ciment étudié, composé du clinker additionné au gypse, et des ajouts minéraux (pouzzolane et Laitier et calcaire).

I-2-1-l'extraction des matières première

- ✓ Le clinker : le clinker utilisé est obtenu de la cimenterie d'Ain-Kebira.



Photo (I-1) : clinker avant le concassage

- ✓ 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, provient de la région de Djemila.



Photo (I-2) : le gypse après le broyage.

- ✓ Le laitier : Le laitier granulé de haut fourneau, il provient de l'usine métallurgique d'El-Hadjar (Annaba) 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 (SiO₂).

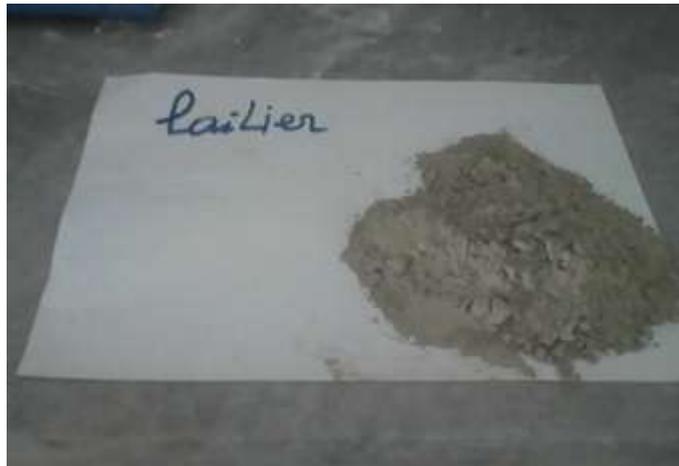


Photo (I-3) : le laitier après broyage.

- ✓ Le calcaire : il provient de la carrière de la cimenterie d'Ain-kbira, sa teneur en carbonate de calcium CaCO₃ est supérieure à 75% en masse.

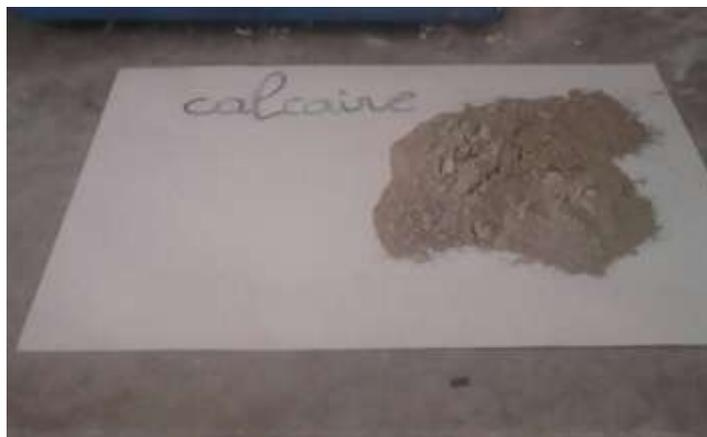


Photo (I-4) : le calcaire après le broyage.

- ✓ La pouzzolane : la pouzzolane provient de la région de Béni-Saf (l'ouest de l'Algérie), c'est une roche sédimentaire ayant une composition chimique et minéralogique appropriées.

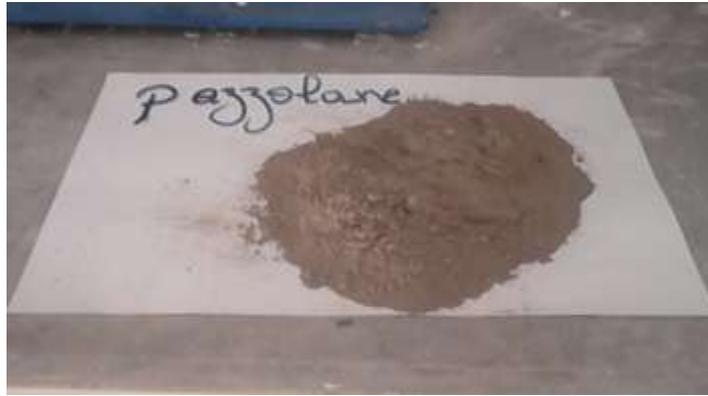


Photo (I-5) : la pouzzolane après broyage.

I-2-2-Etape de préparation des constituants du ciment

I-2-2-1- Le séchage

Il a été effectué dans une étuve de séchage à température 105°C durant 24 h il a pour but de déterminer le taux d'humidité et de sécher les ajouts.



Photo (I-6) : le séchage des ajouts

I-2-2-2-Le concassage

Ayant pour l'objectif de faciliter le broyage du mélange, le concassage a été effectué au laboratoire d'Ain-Kebira dans un concasseur.



Photo (I-7) : concasseur d'Ain-Kebira

I-2-2-3-Le broyage

Les matières premières doivent être broyées très finement (quelques microns) dans un mini-broyeur à boulet de 5kg. Il a été réalisé au laboratoire de cimenterie d'Ain-Kebira.

- Broyage des ajouts : les ajouts ont été broyés avec le même procédé et dans les mêmes conditions que le clinker.



Photo (I-8) : broyeur d'Ain-Kebira

I-3-préparation des mélanges étudiés

I-3-1-Introduction

Cette partie représente la préparation des ciments étudiés (binaires, ternaire et quaternaire) au niveau du laboratoire de L'université de Bordj Bou Arreridj, avec un pourcentage de 20 % pour les trois ajouts pouzzolane, calcaire et le laitier. par contre le clinker broyé reste inchangé avec un pourcentage de 75% et 5% de gypse.

I-3-2-Niveau des facteurs (ajouts)

La délimitation du domaine de variation des facteurs choisis est limitée par un pourcentage de 20% dans nos mélanges à étudier.

I-3-3-Contraintes de construction du plan

Composant	Nom	Unité	Type	Minimum	Maximum
A	pouzzolane	%	Melange	0	20
B	calcaire	%	Melange	0	20
C	laitier	%	Melange	0	20
<u>Total =A+B+C = 20.00 %</u>					

I-3-4- tableau de la Matrice des expériences (Plan de mélange)

Composition réelle pour 20 % d'ajouts et 80 % pour clinker+ gypse					
N° DE MELANGE	Pouzzolane (%)	Calcaire (%)	Laitier (%)	Clinker (%)	Gypse (%)
C1	0	0	0	95	5
C2	20	0	0	75	5
C3	0	20	0	75	5
C4	0	0	20	75	5
C5	10	10	0	75	5
C6	10	0	10	75	5
C7	0	10	10	75	5
C8	10	5	5	75	5
C9	5	10	5	75	5
C10	5	5	10	75	5
C11	4	8	8	75	5
C12	8	4	8	75	5
C13	8	8	4	75	5
C14	6.333	6.33	6.333	75	5

I-3-5-Pesage et étiquetage

Tout les mélanges (14 mélanges) ont été pesés soigneusement et conditionnés dans des sacs du plastiques et étiquetés en fonction des pourcentages de composants.

I-3-6-Agitation

Il est effectuée dans laboratoire de Département de Génie Civil à l'aide de mélange par la main pendant 5 minutes pour chaque mélange.

I-4-Le sable

Le sable utilisé dans chaque mélange est un sable normalisé dans le laboratoire de génie civil de l'université de BBA.



Photo (II-9) : sable normalisé.

I-5-Eau

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

I-6- 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 3,5%, dont la formule chimique est H_2SO_4 , et d'acide HCL avec une concentration de 5%.

❖ 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-10) : acide H₂SO.

❖ HCL

- Formule : HCL.
- Masse molaire : 36,4609 g/mol
- Nom IUPAC : chlorure d'hydrogène.



Photo (I-11): acide (HCL)

Méthode 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, et mécaniques ont été effectués réalisés dans les lieux suivants :

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

II-2- Les essais réalisés

❖ Détermination des propriétés physiques

Pour 14 échantillons on fait les opérations suivantes :

- ✓ la masse volumique absolue. (clinker, gypse, laitier, calcaire, pouzzolane).
- ✓ la masse volumique apparente. (clinker et les ajouts).
- ✓ la consistance normale (pâtes de ciment).
- ✓ début et fin de prise (pâtes de ciment).
- ✓ surface spécifique Blaine (clinker et les ajouts).

❖ Détermination des propriétés chimique

- ✓ l'analyse chimique du clinker et les autres ajouts, l'eau.

❖ Détermination des propriétés mécanique

- ✓ pour le mortier on fait la résistance à la flexion et à la compression à (2 j, 7j, 28j, 60j) 140 éprouvettes.

❖ Essais sur la durabilité

- ✓ Perte de masse
- ✓ Chute de résistance

II-3- Méthodes d'essais et normes

La norme européenne EN 197 sur les ciments fait référence à une autre norme EN 196 Décivant les méthodes d'essais applicables à tous les ciments.

Tableau (II-1) Méthodes d'essais normalisés en Europe. [55]

Objet soumis à l'essai	Propriétés mesurées	Référence de la méthode
Ciments	Détermination de la consistance Normalisée	NF EN 196-3 § 5
Ciments	Détermination du temps de prise	NF EN 196-3 § 6 NF P 15-431
Ciments	Détermination de la finesse par perméabilité de l'air (méthode Blaine)	NF EN 196-6 § 4
Ciments	Masse volumique réelle	NF EN 196-6 § 4.5.3 ASTM C188-72
Mortier	Résistance à la flexion	NF EN 196-1 § 9.1
Mortier	Résistance à la Compression	NF EN 196-1 § 9.2

II-4- Méthodes d'essais et lieux de réalisation**Tableau (II-2) : les lieux de réalisation des essais.**

Objet soumis à l'essai	Propriétés mesurées	Référence de la méthode
Ciments	Détermination de la consistance Normalisée	Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir EL Ibrahimi
Ciments	Détermination du temps de prise	Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir EL Ibrahimi
Ciments	Détermination de la finesse par perméabilité de l'air	Laboratoire cimenterie Ain elkebira Sétif
Ciments	(méthode Blaine) Masse volumique absolue	Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir EL Ibrahimi
Mortier	Résistance à la flexion	Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi
Mortier	Résistance à la compression	Ibrahimi

II-5- Description et mode opératoire des essais**II-5-1- Essais sur ciments****II-5-1-1- Ciments anhydres****II-5-1-1-1- Masse volumique absolue (ASTM C 188-72). [56]****❖ Objectif de l'essai**

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre et des différentes compositions préparées de ciment.

❖ **Principe de la mesure (avec le chatelier-Voluménomètre)**

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit lorsqu'on y introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue

❖ **Équipement nécessaire**

- ✓ Un voluménomètre d'une contenance minimale de 50 cm³.
- ✓ Un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C.
- ✓ Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, du toluène par exemple (le tétrachlorure, le benzène, cancérigène, le pétrole, ne doit plus être utilisé).
- ✓ Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon
- ✓ Un thermomètre, précis à 0,1 °C, permettant de connaître la température du laboratoire.

❖ **Conduite de l'essai: (Mode opératoire)**

Remplir le voluménomètre d'essence à brûler jusqu'à ce que le niveau du liquide parvienne entre la graduation 0 et 1. Utiliser à cet effet l'entonnoir à long col pour éviter de mouiller les parois intérieures du voluménomètre. Noter alors le niveau initial : N₀.

- Introduire à l'aide de la spatule 64 g de ciment, en évitant de laisser le ciment se déposer sur les parois.
- Si des amas de ciment se forment, désobstruer l'intérieur du voluménomètre à l'aide de la tige métallique.
- Une fois la totalité du ciment introduite, bouché le voluménomètre.
- Incliner le voluménomètre à 45° par rapport au plan de travail.
- Faire rouler le voluménomètre par un mouvement de va-et-vient pour chasser l'air. Noter alors le niveau final N₁.

La masse volumique absolue est donnée par le rapport :

$$\rho_c = \frac{64}{N_1 - N_0} \cdot \text{g/cm}^3$$

D'après. [57]

II-5-1-1-2- Mesure de la finesse (EN 196-6) .d'après [58]

❖ **Objectif de l'essai**

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante: lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement

exprimée en cm² de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

❖ *Principe de l'essai*

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre.

La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t}

❖ *Équipement nécessaire*

- ✓ Un appareil appelé «Perméabilité de Blaine».
- ✓ Une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester.
- ✓ Un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère.
- La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.
- 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.
- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer température de l'air

❖ *Conduite de l'essai (Mode opératoire)*

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à porosité constante (égale à 0,500).

- Méthode : peser à 0,01 g près, une masse m de liant telle que, compte tenu de son volume V après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0,500.

- La masse de matière à prendre s'écrit: $m = (1 - e) P_v$. [58]

ρ - masse volumique

V – volume utile de la cellule.

- Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier filtre.
- Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.

- Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.
- Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.
- Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur.
- Enduire de vaseline la partie rondie de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.
- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.
- L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait
- Noter le temps écoulé t ainsi que la température de la pièce.
- Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.

La surface spécifique est calculée par la formule:

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \quad [57]$$

S – Surface spécifique (cm^2/g).

k – Constante de l'appareil.

e – Porosité de la couche tassée.

t – Temps mesuré en secondes.

ρ - Masse volumique (g/cm^3).

η - Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises). [56]

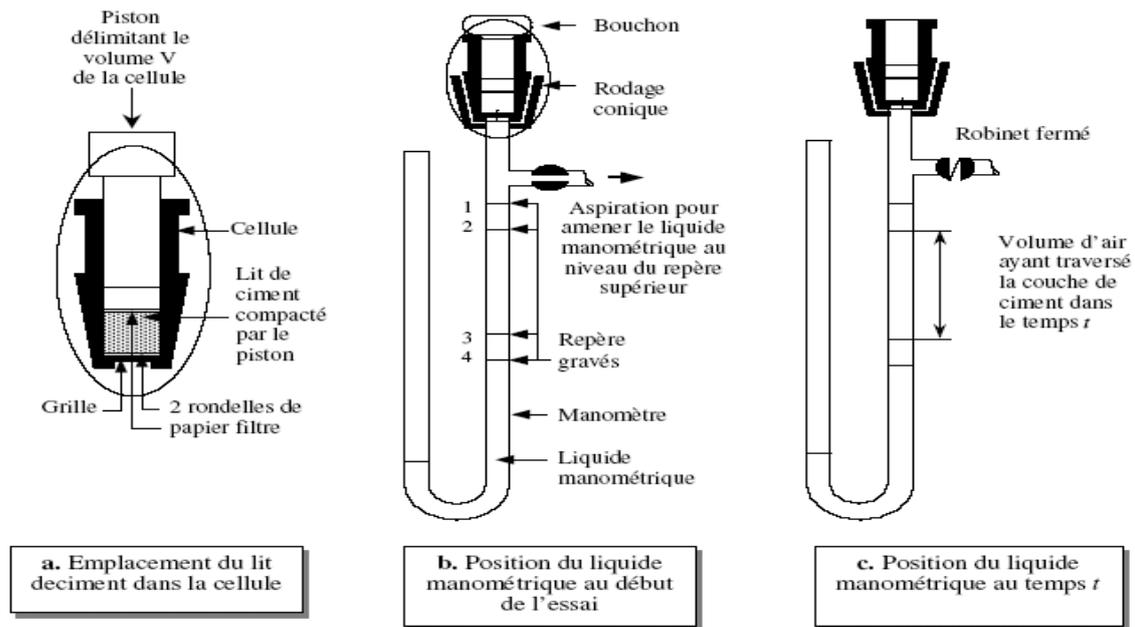


Figure (II-1) : Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine. [58]

II-5-1-2- Ciment hydraté

II-5-1-2-1- Mesure de la consistance de la pâte. (NF EN 196-3). [58]

❖ Objectif de l'essai

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette consistance.

1. L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196-3.2.

L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NF P-18-358.

2. La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite «CONSISTANCE NORMALISEE ».

❖ Principe de l'essai

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée «consistance vicat».

❖ Equipement nécessaire

✓ Un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).

✓ Un appareil de VICAT. L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre. La partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible).

✓ Une balance permettant de peser à 1 g près.

✓ Une Chronomètre précis à 1 s près.

❖ **Conduite de l'essai**



Photo (II-1) : pates normalisées

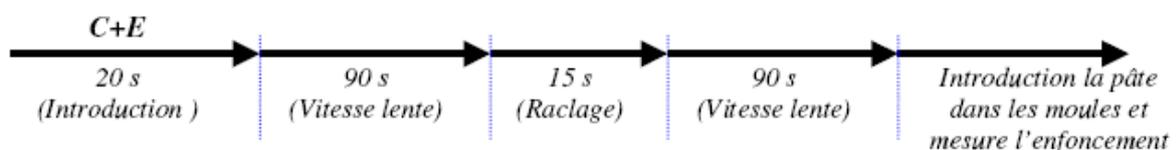
• 500 g de ciment introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s.

• Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

Tableau (II-3) : Principe de préparation de la pate [57]

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente



• La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

• l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat.

• Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base.

Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.

◆ Si $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée.

(Consistance normalisée).

◆ Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.a.d $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

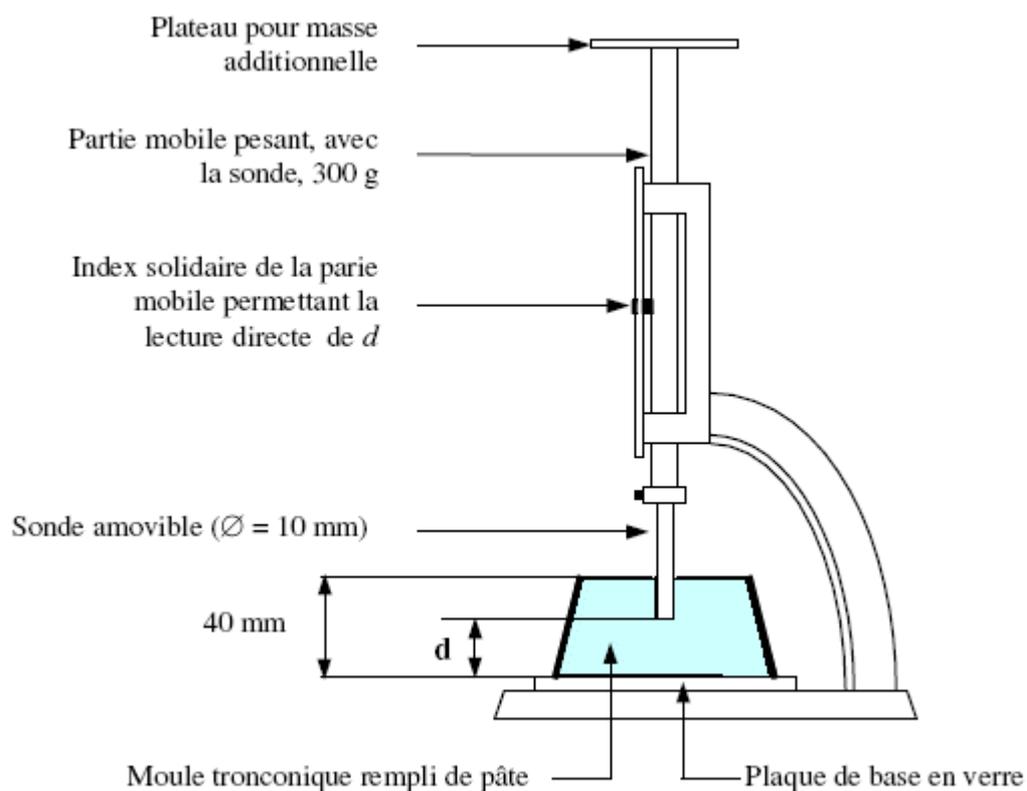


Figure (II-2) : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance [58]

II-5-1-2-2-Mesure des temps de début et fin de prise (NF EN 196-3)

❖ Objectif de l'essai

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment(des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: Le début de prise et la fin de prise.

❖ *Principe de l'essai*

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE» est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm. [59]

❖ *Equipement nécessaire*

✓ Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

✓ Malaxeur normalisé: avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn)

✓ Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.

✓ Balance précise à 0,1 g près.

✓ Chronomètre précise à 0,1 s près.

❖ *Conduite de l'essai*

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3.

- Réaliser une pâte de consistance normale
- Equiper l'appareil de Vicat de l'aiguille, et régler l'appareil par abaissement de l'aiguille jusqu'à la plaque de base et ajustement du repère au zéro de l'échelle de la plaque graduée.
- Introduire immédiatement la pâte dans le moule et l'araser.
- Placer le moule rempli sous l'appareil de Vicat
- Abaisser l'aiguille jusqu'au contact de la pâte.
- Observer une pause de 1 à 2 secondes à cette position, de manière à éviter une vitesse initiale des parties mobiles.
- Lâcher alors rapidement les parties mobiles et laisser pénétrer verticalement dans la pâte.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30 secondes après la libération de l'aiguille.

- Noter la lecture de l'échelle qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base.
 - Répéter l'essai de pénétration sur la même pâte à des positions espacées de plus de 10 mm des bords du moule, à des intervalles de temps réguliers de 10 à 15 minutes jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné.
- [58]

II-5-2- Essais sur mortier

II-5-2-1- Mesure des résistances à la compression et à la flexion (EN 196-1)

❖ Objectif de l'essai

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.



Photo (II-2) : mortier préparé

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier les résistances à la flexion et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment

❖ Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1. Il est énuméré ci-dessus.

- ✓ Une salle maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- ✓ Un malaxeur
- ✓ Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ ").
- ✓ Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- ✓ Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion.

✓ Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 kN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression.

❖ *Conduite de l'essai*

Pesé des constituants nécessaires aux essais avec précision de 0.5%

1. Sable = 1350 g

2. Ciments = 450 g de ciment.

3. Eau = 225 g, soit ($E/C = 0.5$), quantité qui donne le même affaissement pour tous les mortiers préparés. La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule ($4 \times 4 \times 16$). Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20 \text{ C}^\circ \pm 1 \text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2, 7,28 et 60 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure suivante :

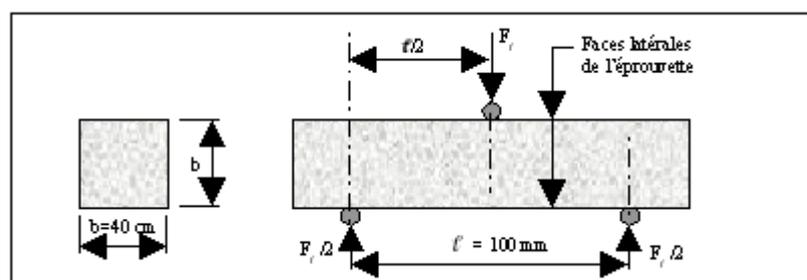


Figure (II-3) : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion. [57]

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5 F_f l}{b^3} \quad [58]$$

Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f \text{ (MPa)} = 0.00234 F_f \text{ (N)}. \quad [58]$$

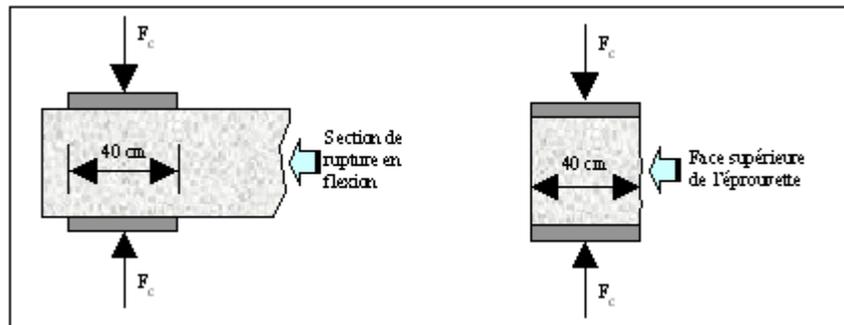


Figure (II-4) : Dispositif de rupture en compression. [58]

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad [58]$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newton, cette résistance exprimée en mégapascals vaut :

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{F_c \text{ (N)}}{1600} \quad [58]$$

II-6-Essais sur la durabilité

❖ Procédure de l'essai

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes de mortier $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été confectionnées selon la Norme ENV 197-1. Démoulées à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à $20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ 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 l'acide sulfurique 3,5 % et 5% pour acide de chlore.

- 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.



Photo (II-3) : des éprouvettes après 9 j d'immersion dans H₂SO₄

- ✓ La chute de résistance est évaluée par la formule suivante :

$$\text{Chute de résistance (\%)} = [(R_1 - R_2) / R_1] \times 100$$

Avec :

R₁ : la résistance des éprouvettes à 28j.

R₂ : la résistance des éprouvettes à 60 j.

Le PH mètre

- ✓ ***Cas d'un mortier***



Photo (II-4) : mesure du PH du mortier.

- ✓ ***Cas des pates***



Photo (II-5) : mesure du PH des pates.

Tableau (II-4) : le PH mesuré à 9j et 60j.

	A (9j)	A (60j)
PH de H ₂ SO ₄	0.29	2.45
PH de HCL	2.47	3.40

Tableau (II-5) : le ph mesuré à 6j et 28j.

	A (6j)	A (28j)
PH de HCL des pates	1.24	3.15

Caractérisation des matériaux utilisés

III-1-le sable

Le sable utilisée est un sable normalisé obtenu de laboratoire de l'université.

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) .

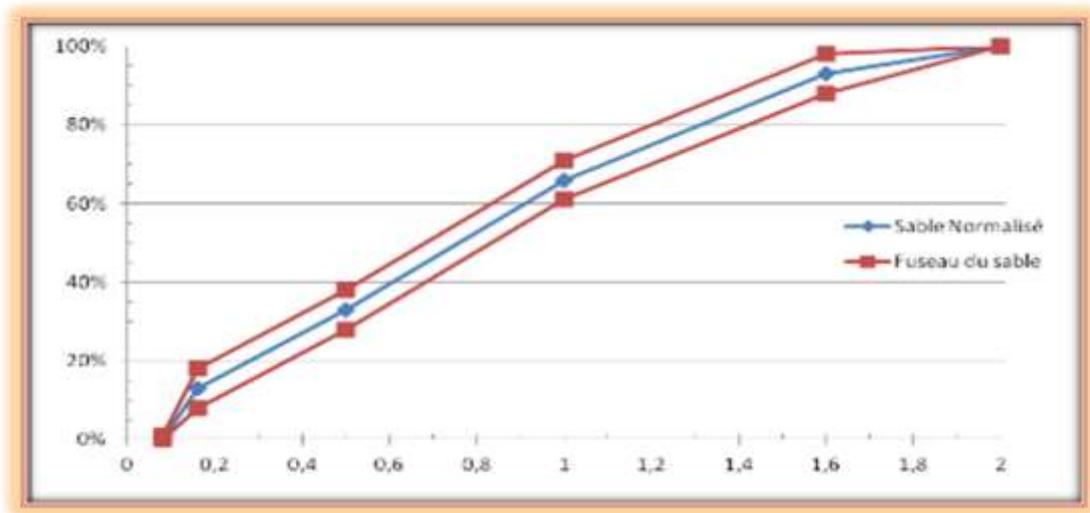


Figure (III-1) : Courbe granulométrique du sable normalisé. [60]

III.2. Caractérisation des composants cimentaires

▪ Les essais physiques

Tableau (III.1) : la masse volumique et SSB des composants.

Les composants	La masse volumique absolue g/ml	SSB cm ² g/
Le clinker	3.1	3786
Gypse	2.54	6705
Calcaire	2.75	3766
Laitier	2.91	3520
Pouzzolane	2.52	3560

- *L'analyse chimique*

Les compositions chimiques de clinker et ajouts :

Tableau (III-2) : La composition chimique de clinker et des 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	12,16	1,14	46.69	0,57	0,81	0,65	0,039	0,002	37,933
Laitier	35.52	8.88	26.11	2,92	2,58	1,50	1.268	0,002	21,205
Pouzzolane	37,26	15.37	17.01	10.55	3.06	0,38	1.339	0,009	15.024

III.3. L'eau de gâchage

Tableau (III-3) : les résultats obtenus concernant les analyses physico chimiques de l'eau. [60]

Paramètres physiques	Méthodes utilisés	Résultat	Normes
PH	pH mètre	8.18	6,5-8,5
Conductivité µs/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	Méthodes utilisés	Résultats	Normes
Nitrites (NO ₂ ⁻) mg/l	Photo-Flex	< 0.15	Concentration max = 0,1
Nitrates (NO ₃ ⁻) mg/l	Photo-Flex	< 1.8	Concentration max =

			50
phosphates mg/l	Photo-Flex	< 0,5	0,5-25,00
Minimalisation globale	Méthodesutilisés	Résultats	Normes
Magnésium mg/l	Photo-Flex	35	5-215
Sulfate mg/l	Photo-Flex	151	25-250
Dureté TH °F	Photo-Flex	23,5	15-50

Partie 3

Résultats et interprétations

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 2-7-28 et 60jours, sur la résistance de ces mortiers à l'attaque acide sulfurique (H_2SO_4) et d'acide chloridrique (HCL).

I-2- Les résultats

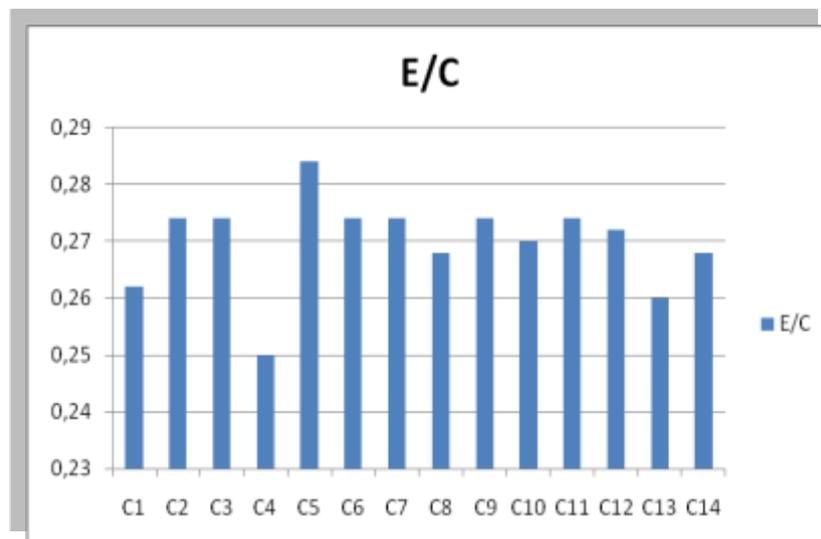
I-2-1-La surface spécifiques blaine et la masse volumique de chaque mélange

Tableau (I-1) : La Surface spécifique Blaine et la masse volumique de chaque type de ciment.

Type de ciment	La masse volumique (g /ml)	SSb (cm ² /g)
C1	3.072	3931.95
C2	2.956	3886.75
C3	2.960	3927.95
C4	3.034	3878.75
C5	2.979	3907.35
C6	2,995	3882.75
C7	3.018	3903.35
C8	2.987	3985.05
C9	2,998	3905.35
C10	3.000	3893.05
C11	3.005	3900.03
C12	2.996	3891.79
C13	3.106	4042.43
C14	2,970	3861.62

I-2-2-Préparation des pates✓ *La consistance des pates***Tableau (I-2) :** La Variation de La consistance normale des ciments étudiés.

N° de mélange	Pouzzolane (g)	Calcaire (g)	Laitier (g)	Clinker+gypse (g)	Eau(ml)	E/C
C1	0	0	0	500	131	0.262
C2	100	0	0	400	137	0.274
C3	0	100	0	400	137	0.274
C4	0	0	100	400	125	0.25
C5	50	50	0	400	142	0.284
C6	50	0	50	400	137	0.274
C7	0	50	50	400	137	0.274
C8	50	25	25	400	134	0.268
C9	25	50	25	400	137	0.274
C10	25	25	50	400	135	0.27
C11	20	40	20	400	137	0.274
C12	40	20	40	400	136	0.272
C13	40	40	20	400	130	0.26
C14	33.33	33.33	33.33	400	134	0.268

**Figure (I-1):** le rapport E/C pour préparer les pates.

✓ *Début et la fin de la prise des ciments utilisés***Tableau (I-3) :** Evolution du temps de prise (début et la fin) des ciments étudiés.

N° de mélange	Pouzzolane (g)	Calcaire (g)	Laitier (g)	Clinker +gypse (g)	Début de prise (min)	la fin de prise (min)
C1	0	0	0	500	195	210
C2	100	0	0	400	200	232
C3	0	100	0	400	190	220
C4	0	0	100	400	139	172
C5	50	50	0	400	185	242
C6	50	0	50	400	217	297
C7	0	50	50	400	147	176
C8	50	25	25	400	199	231
C9	25	50	25	400	174	206
C10	25	25	50	400	135	168
C11	20	40	40	400	151	170
C12	40	20	40	400	168	192
C13	40	40	20	400	137	162
C14	33.33	33.33	33.33	400	191	223

Les résultats du tableau démontrent clairement que la prise des ciments contenant un taux élevé de laitier est plus accélérée.

La pouzzolane consomme plus d'eau (137 ml) avec un délai de prise lent (200 min).

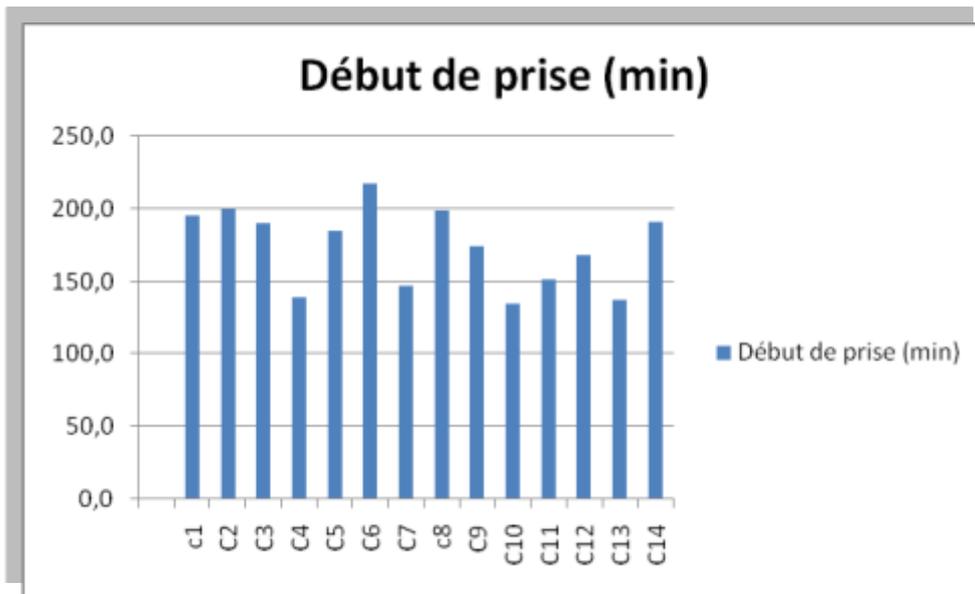


Figure (I-2) : début de prise des pates.

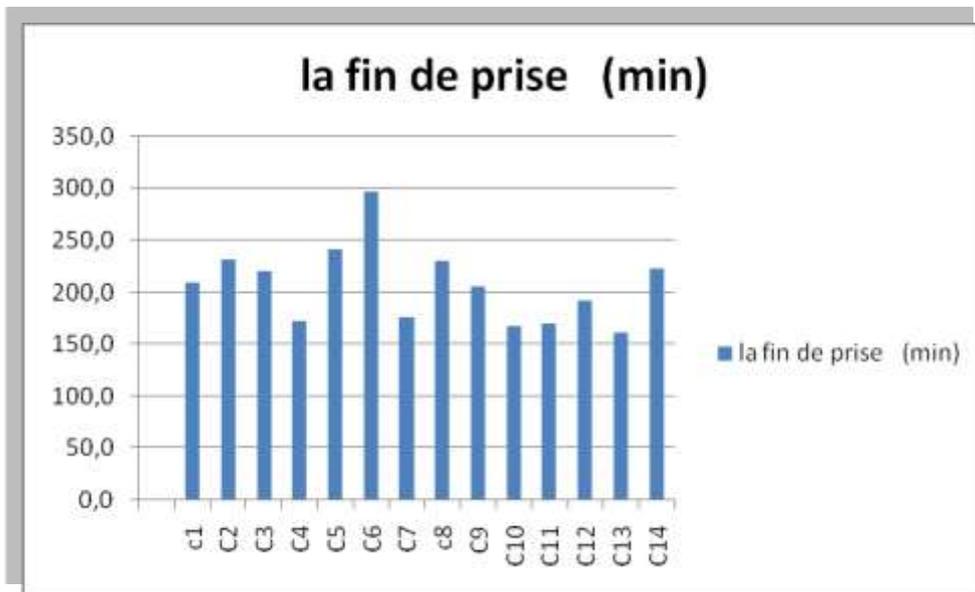


Figure (I-3) : fin de prise des pates.

✓ *Perte de masse des pâtes immergées dans HCL (PH=3.34 à T=20.8°C)*

Tableau (I-4): La perte de masse des pâtes (%).

Ciment	M1	M	M2	Perte (6j)	Perte (23j)
C1	410	373	369	9.02	10
C2	397	383	382	3.52	3.77
C3	410	397	396	3.17	3.41
C4	418	392	389	6.22	6.93
C5	387	365	362	5.68	6.45
C6	420	406	405	3.33	3.57
C7	390	373	371	4.35	4.87
C8	415	394	391	5.06	5.78
C9	392	372	370	5.1	5.61
C10	404	386	385.5	4.45	4.57
C11	401	381	380	4.98	5.23
C12	413	395	392	4.35	5.08
C13	398	371	365	6.78	8.29
C14	428	397	393	7.24	8.17

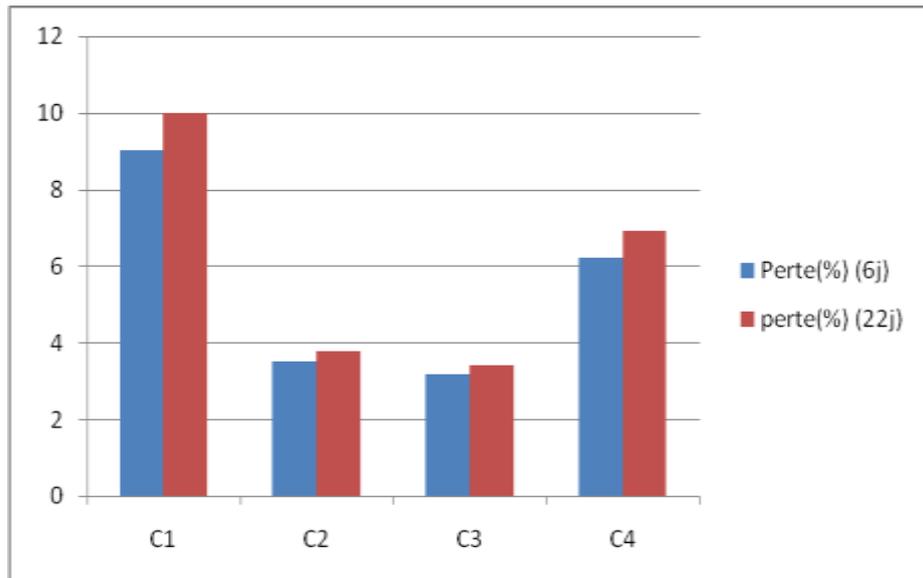


Figure (I-4) : perte de masse des pates d'un ciment binaire.

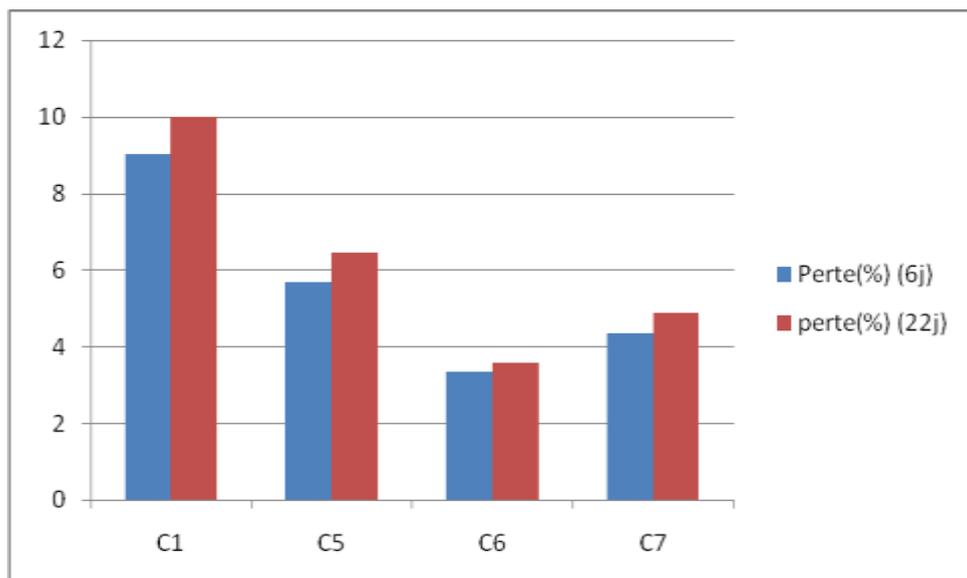


Figure (I-5) : perte de masse des d'un ciment ternaire

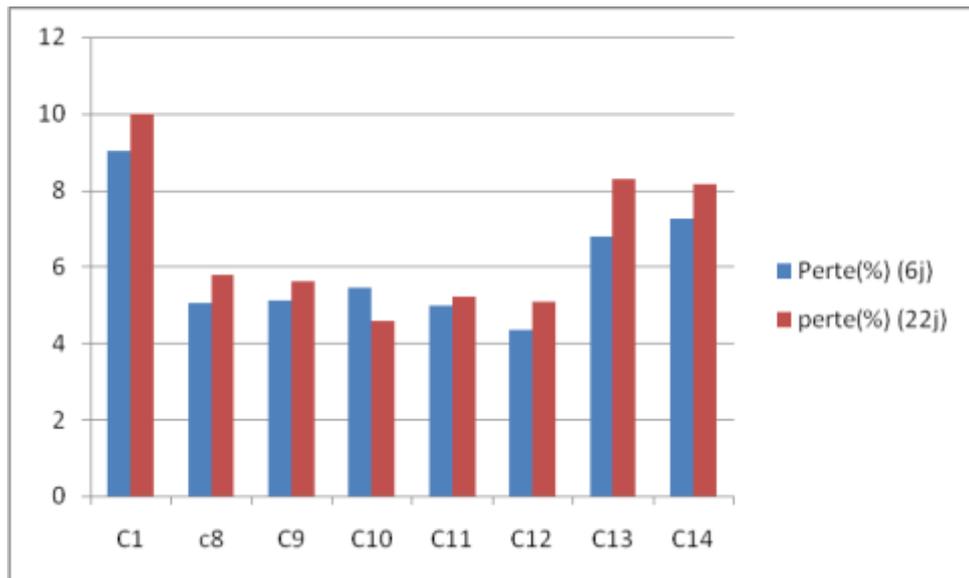


Figure (I-6) : perte de masse des pates d'un ciment quaternaire.

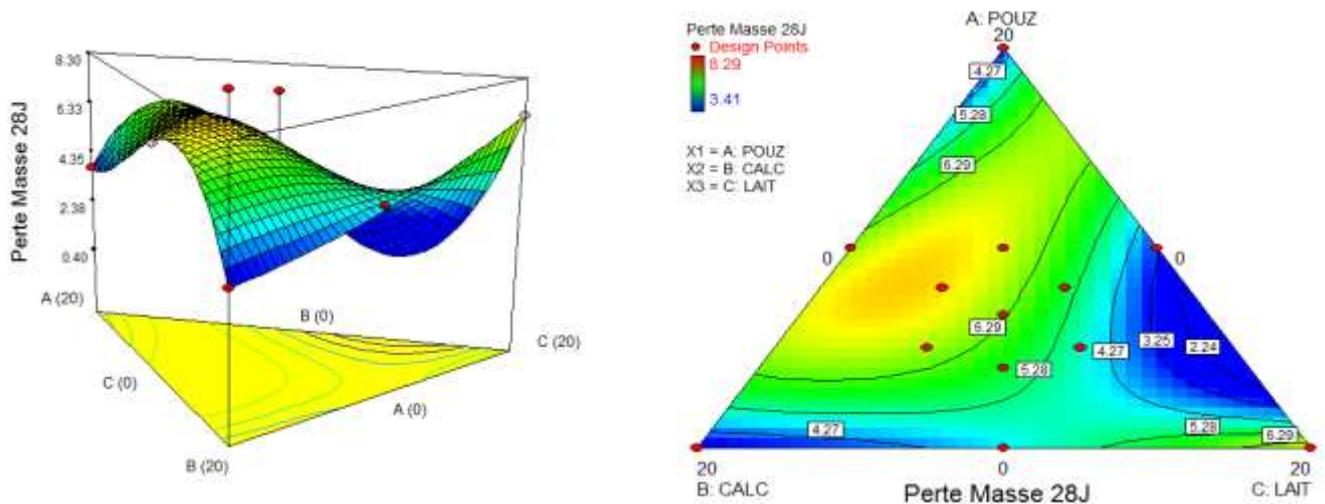


Figure (I-7) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la perte de masse à 28 j (HCL).

- Le ciment binaire montre une bonne résistance à la perte de masse dans un milieu agressif de HCL notamment avec calcaire, et les ciment binaire et ternaire avec laitier et la pouzzolane et laitier calcaire sont moins résistants comparativement au ciments binaire est on note une faible résistance à la perte pour les ciments quaternaire.

I-2-3-Le mortier**✓ Résultat à la Compression****Tableau (I-5):**La résistance mécanique à la compression.

Type de ciment	Quantité des ajouts			La résistance en Mpa			
	Pozzo (%)	calcaire (%)	laitier (%)	2j	7j	28j	60j
C1	0	0	0	8.498	18.525	26.248	34.350
C2	20	0	0	8.543	17.584	25.133	30.555
C3	0	20	0	10.823	19.862	29.828	37.275
C4	0	0	20	9.800	18.858	27.342	33.092
C5	10	10	0	9.634	16.940	30.192	31.532
C6	10	0	10	9.414	20.593	31.864	37.592
C7	0	10	10	10.975	21.408	31.162	34.100
C8	10	5	5	6.468	24.598	34.548	31.650
C9	5	10	5	8.042	18.878	29.309	31.576
C10	5	5	10	9.832	20.731	29.099	35.846
C11	4	8	8	8.666	19.117	26.440	32.909
C12	8	4	8	9.036	19.075	28.997	29.400
C13	8	8	4	8.230	18.089	26.909	30.069
C14	6.333	6.333	6.333	8.23	18.09	26.91	30.07

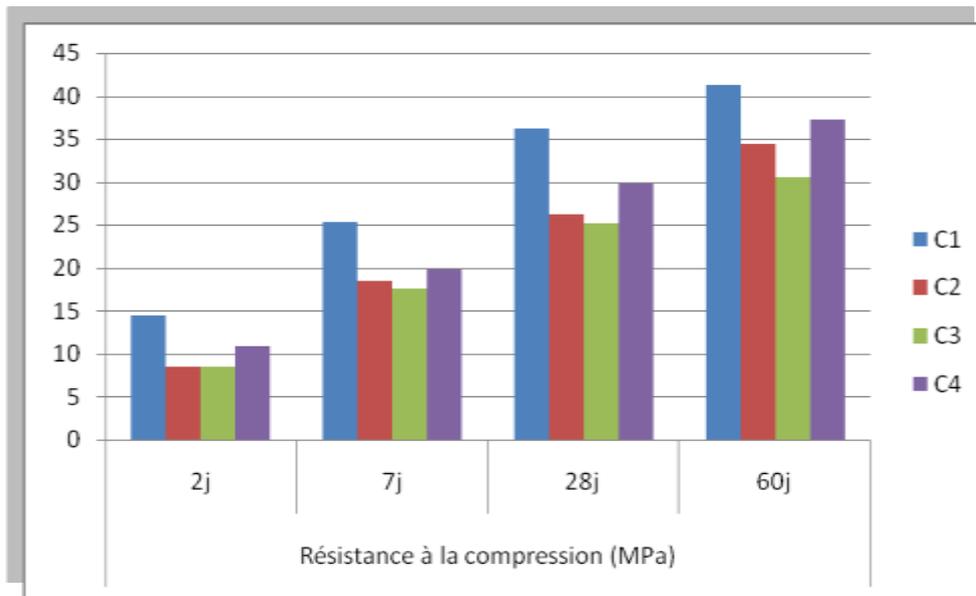


Figure (I-8) : Résistance à la compression d'un ciment binaire.

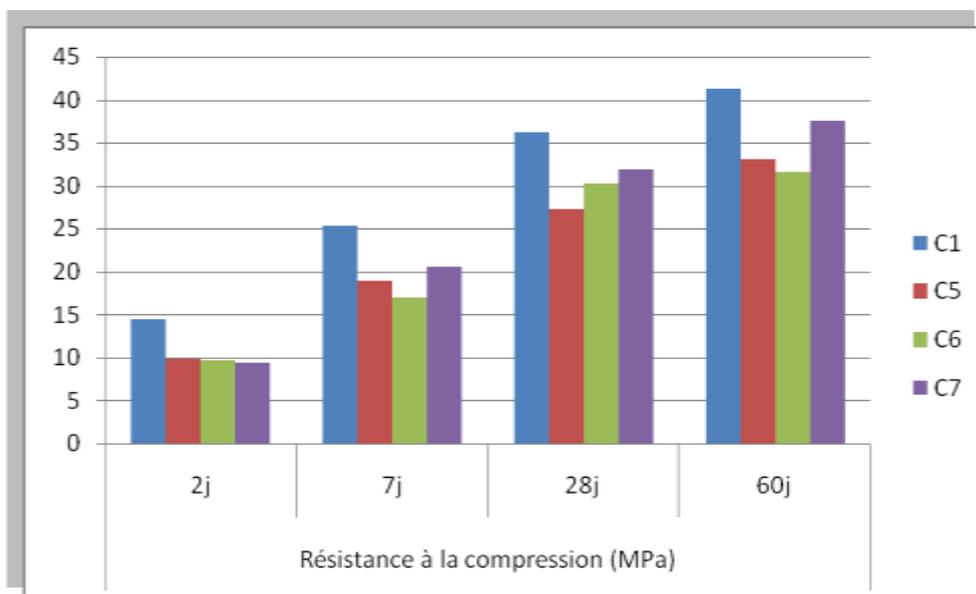


Figure (I-9) : Résistance à la compression d'un ciment ternaire.

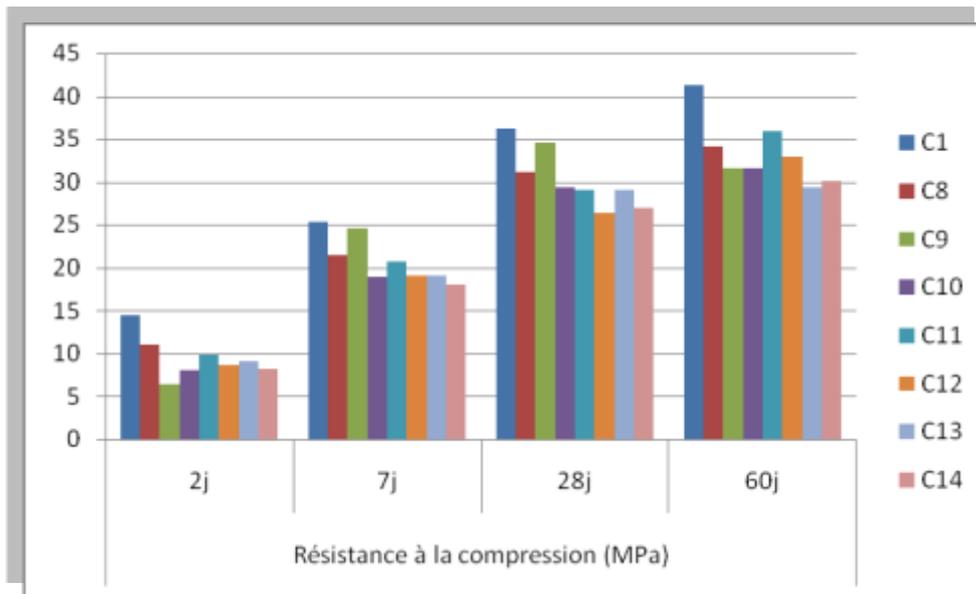


Figure (I-10) :Résistance à la compression d’un ciment quaternaire.

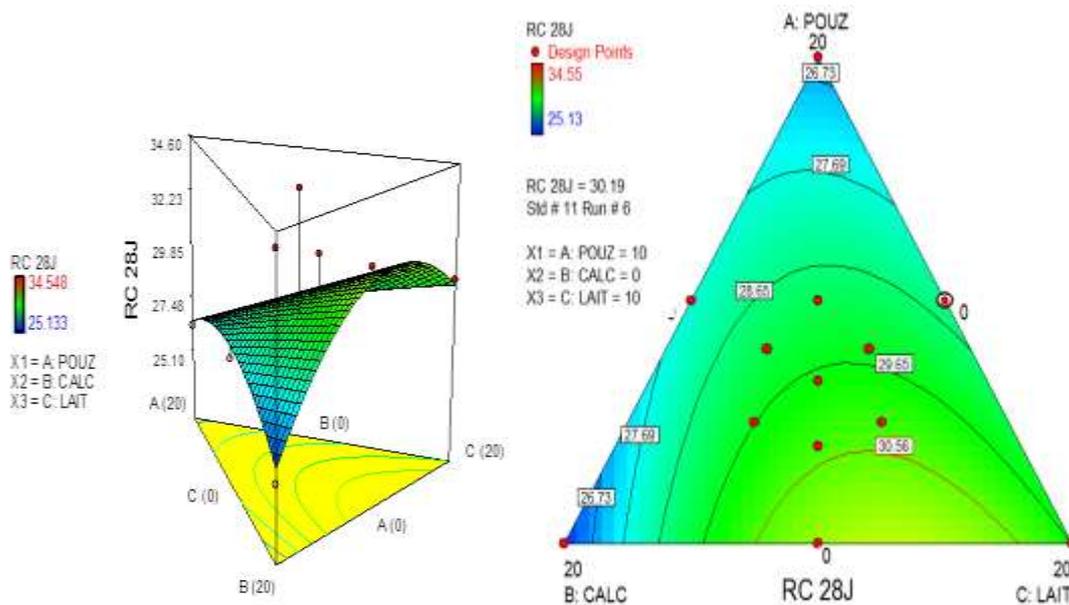


Figure (I-11) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 28j.

- D'après les résultats on remarque que les résistances évoluent avec l'âge du mortier (2j, 7j et 28 j, 60j).

Il est clair que les résistances se développent davantage pour un ciment binaire avec le laitier qui donne de meilleures résistances mécaniques à courts et à long terme comparativement au calcaire et la pouzzolane, cette dernière donne des résistances meilleures que les ciments avec calcaire, pour l'ensemble des mélanges la résistance est faible pour les ciments ternaires et quaternaires avec calcaire, Et meilleures dans les ciments ternaires ou quaternaires avec laitier et pouzzolane.

✓ *Résultat à la flexion*

Tableau (I-6): La résistance mécanique à la flexion.

Type de ciment	Quantité des ajouts			La résistance en Mpa			
	Pouzzo (%)	Calcaire (%)	Laitier (%)	2j	7j	28j	60j
C1	0	0	0	0.867	1.331	0.102	1.025
C2	20	0	0	0.689	0.928	0.118	0.952
C3	0	20	0	0.610	1.094	0.112	0.918
C4	0	0	20	0.632	1.041	0.114	0.995
C5	10	10	0	0.776	1.082	0.108	0.920
C6	10	0	10	0.742	1.017	0.104	0.987
C7	0	10	10	0.750	0.098	0.096	1.033
C8	10	5	10	0.660	0.099	0.085	0.934
C9	5	10	5	0.821	0.132	0.094	1.003
C10	5	5	10	0.858	0.098	0.962	0.889
C11	4	8	8	0.954	0.115	0.806	0.918
C12	8	4	8	0.071	0.088	0.697	0.968
C13	8	8	4	0.076	0.103	0.835	1.043
C14	6.333	6.333	6.333	0.074	0.091	0.699	0.936

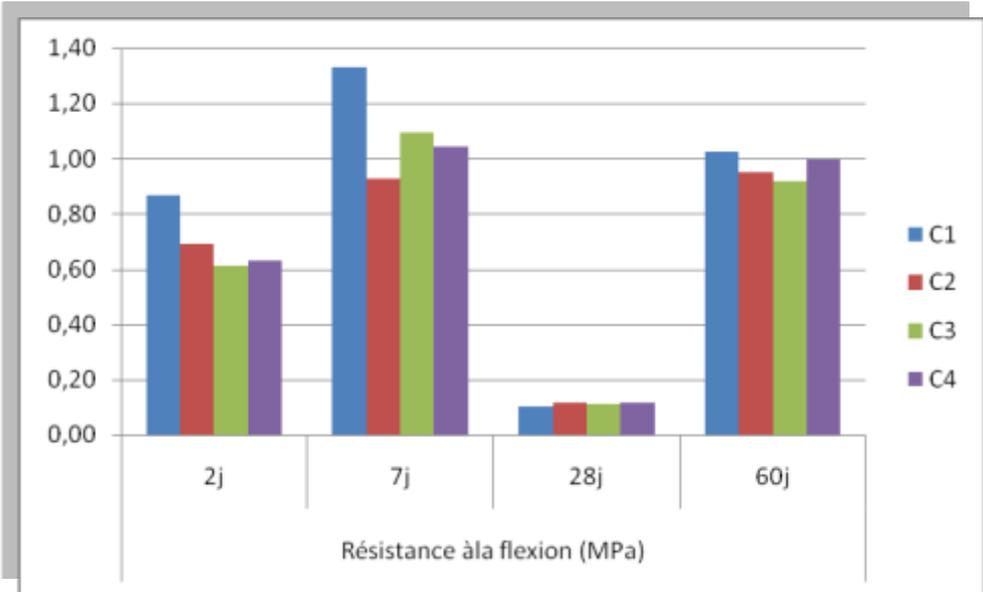


Figure (I-12): la résistance à la flexion d'un ciment binaire.

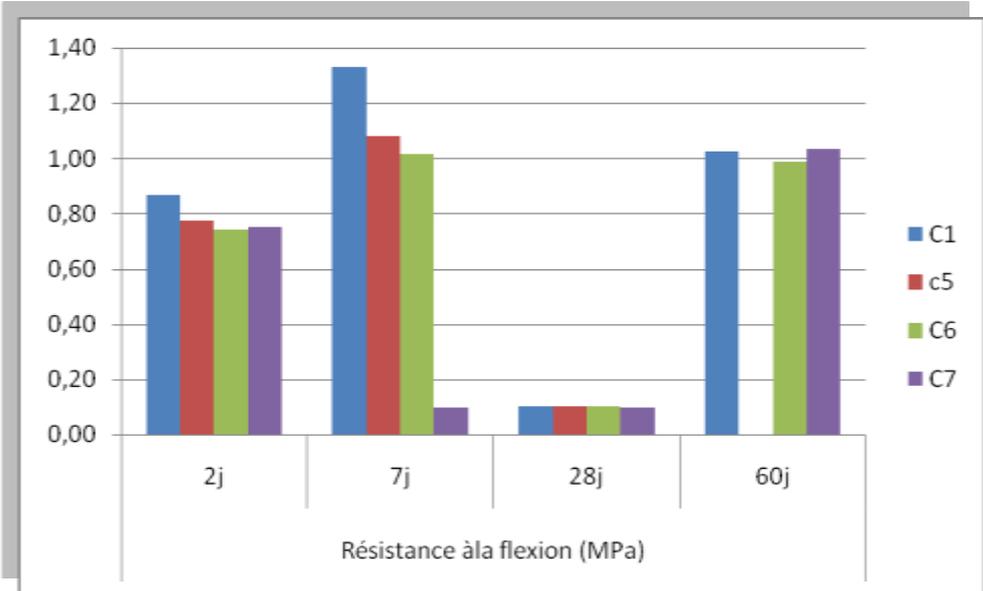


Figure (I-13) : la résistance à la flexion d'un ciment ternaire.

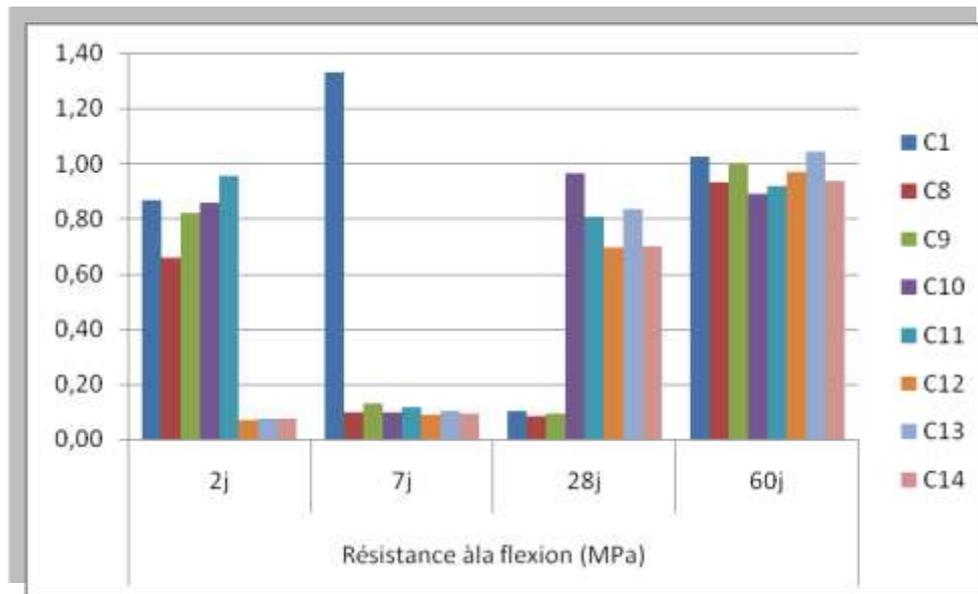


Figure (I-14) : la résistance à la flexion d'un ciment quaternaire.

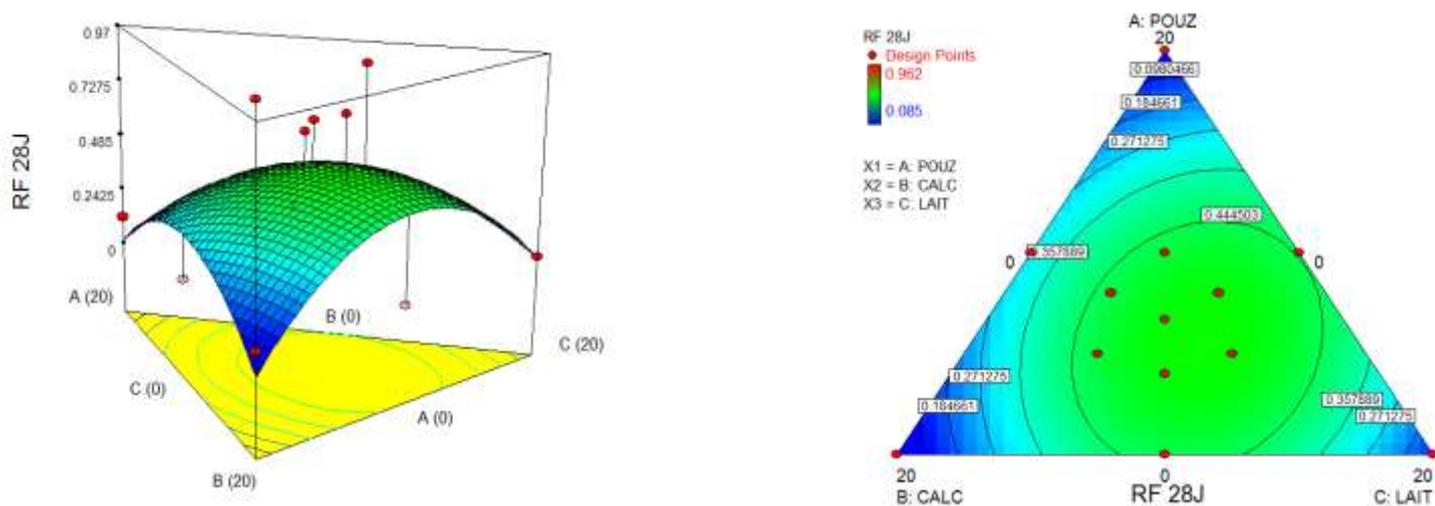


Figure (I-15) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la résistance à la flexion à 28 j

D'après les résultats on remarque que la résistance à la flexion est meilleure pour les ciments quaternaires là où il y a addition de tous par contre pour les ciments binaires elle est très faibles.

✓ *La chute de résistance dans un milieu agressif avec H₂SO₄ (PH=2.45 à T=20.8°C).*

Tableau (I-7): La chute de la résistance (cas d'un H₂SO₄).

Ciment	R ₁	R ₂	La chute (%)
C1	36.223	10.564	70.83
C2	26.248	7.832	70.16
C3	25.133	7.478	70.24
C4	29.828	9.915	66.75
C5	27.342	10.786	60.55
C6	30.192	8.374	72.26
C7	31.864	10.433	67.25
C8	31.162	2.889	90.72
C9	34.548	2.172	93.71
C10	29.309	11.613	60.37
C11	29.099	10.161	65.08
C12	26.440	12.823	51.50
C13	28.997	15.161	47.71
C14	26.909	11.605	56.87

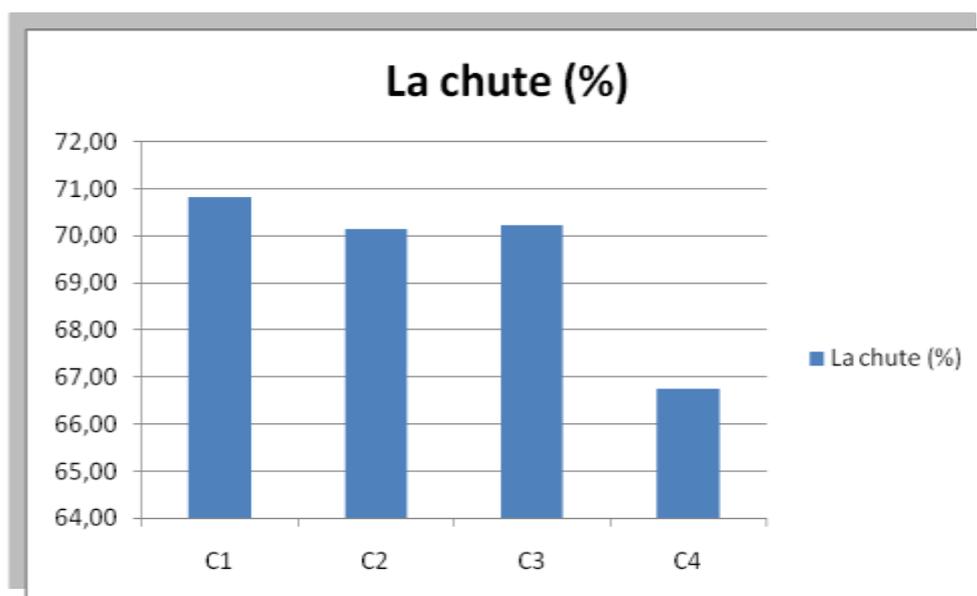


Figure (I-16) :Chute de résistance diun ciment binaire(cas d'un H₂SO₄).

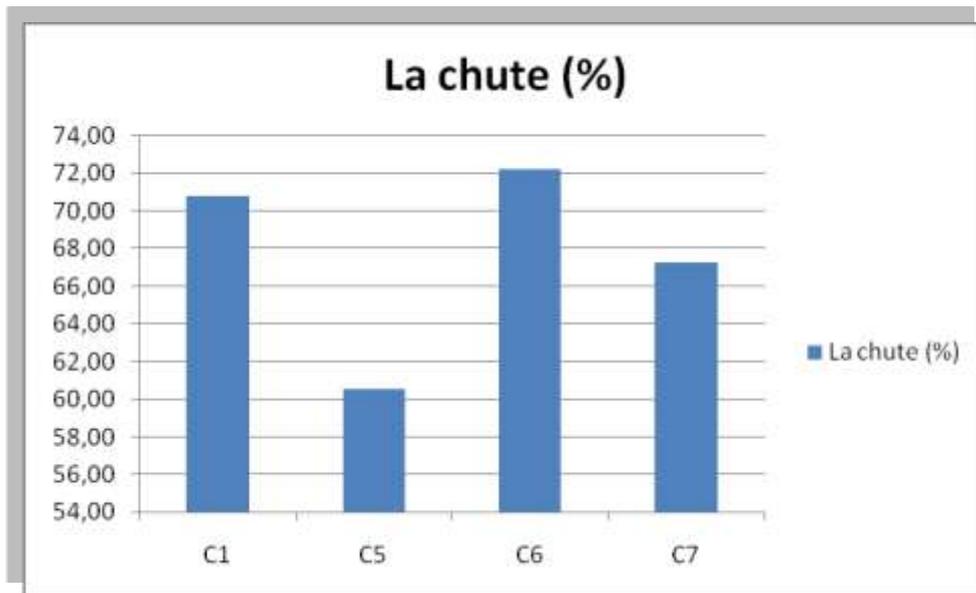


Figure (I-17) :Chute de résistance diun ciment ternaire (cas d'un H₂SO₄).

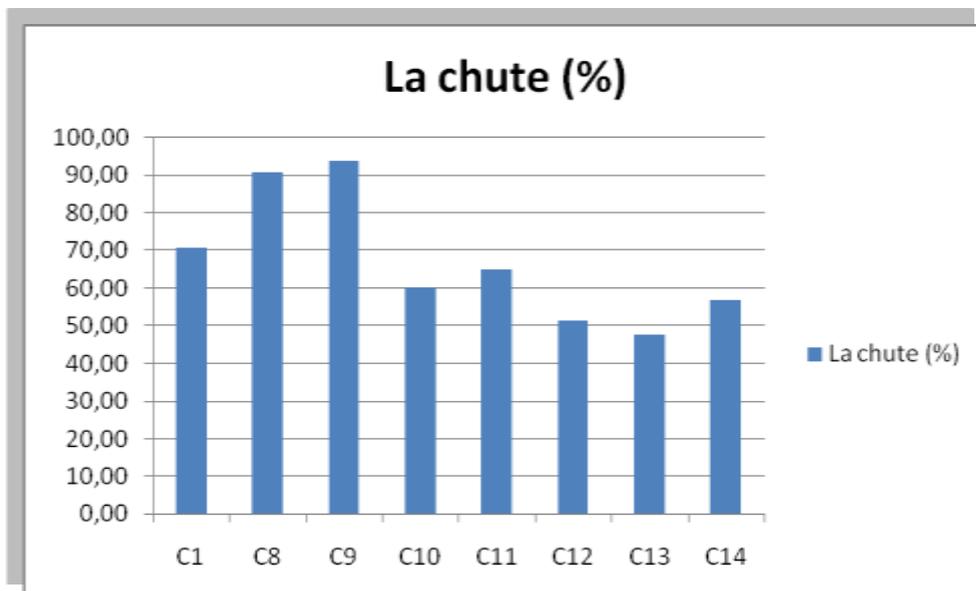


Figure (I-18) :Chute de résistance diun ciment quaternaire (cas d'un H₂SO₄).

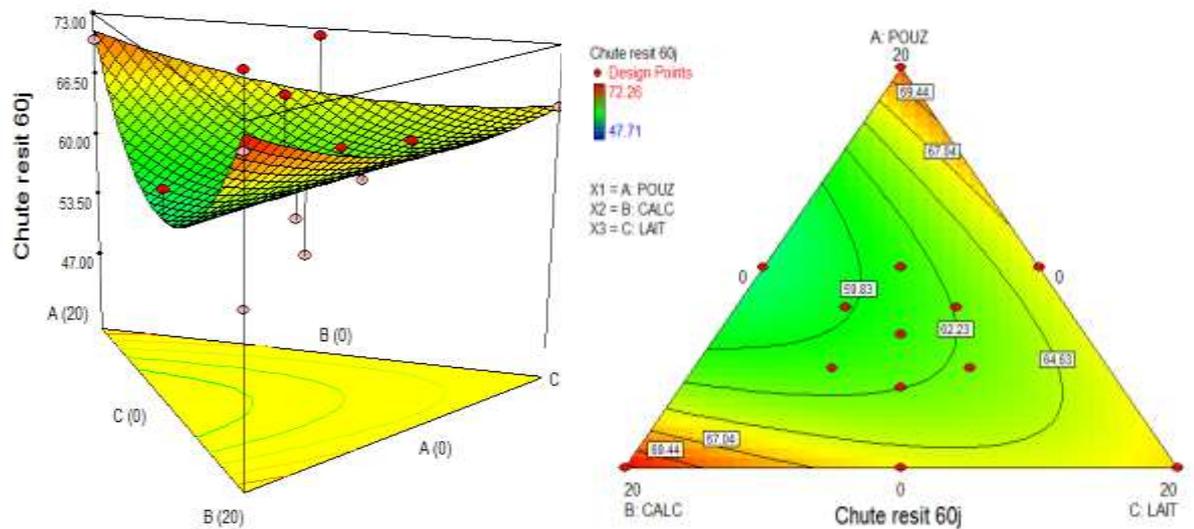


Figure (I-19) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la chute de résistance à 60 j (H₂SO₄)

D'après les résultats on remarque que la chute de résistance plus élevée pour le ciment binaire (calcaire-pouzzolane-laitier) avec une meilleure tenue du laitier, mais sa très proche de celle d'un ciment témoin sans ajouts avec un différentiel de 1% ce qui permet au ciment binaire d'offrir une meilleure résistance à l'acide H₂SO₄.

En revanche la chute de résistance pour les ciments quaternaire là où il y a addition des trois ajouts à la fois elle est plus faible, ce qui offre aux mortiers avec ciment quaternaire un bon pouvoir de résistance au milieu agressif avec un différentiel de 42% par rapport au ciment sans ajouts.

En fin le ciment ternaire montre une résistance faible par rapport au ciment quaternaire et meilleure comparativement à celui du ciment binaire.

- *La chute de résistance dans un milieu agressif avec HCL (PH=3.40 à T=20.8°C)*

Tableau (I-8): La chute de la résistance. (Cas d'un HCL).

Ciment	R ₁	R ₂	La chute (%)
C1	36.223	2.349	93.51
C2	26.248	1.962	92.52
C3	25.133	14.117	43.83
C4	29.828	26.720	10.41
C5	27.342	17.601	35.62
C6	30.192	19.525	35.33
C7	31.864	19.738	38.05
C8	31.162	20.137	35.37
C9	34.548	23.018	33.37
C10	29.309	18.907	35.49
C11	29.099	22.509	22.64
C12	26.440	22.743	13.98
C13	28.997	16.817	42.00
C14	26.909	15.975	38.95

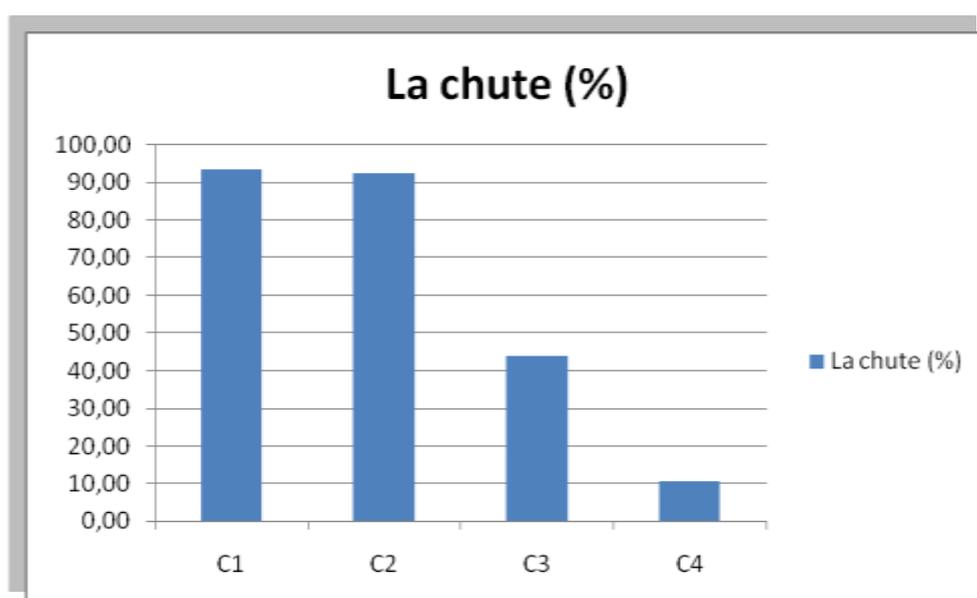


Figure (I-20) : Chute de résistance diun ciment binaire (cas d'un HCL).

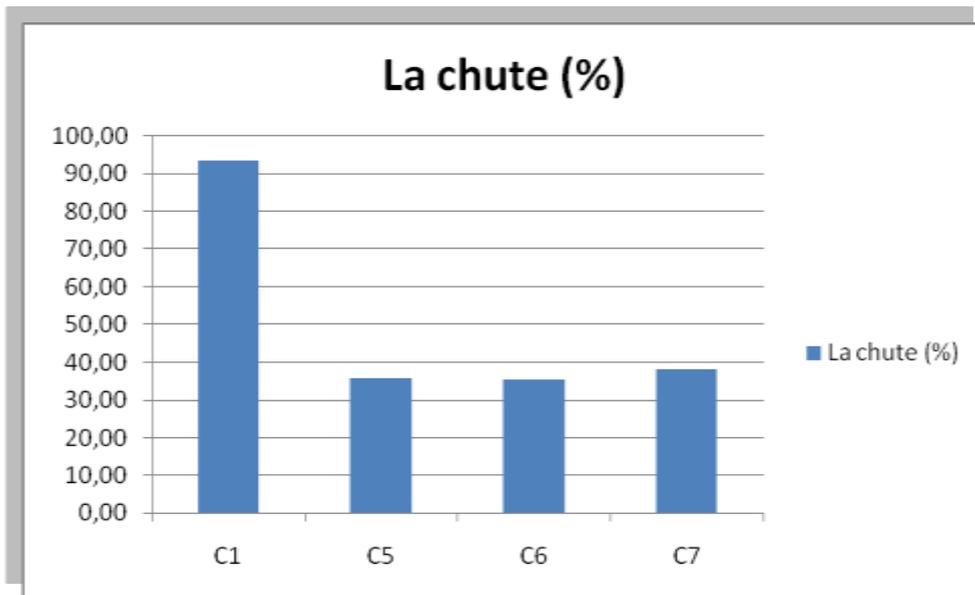


Figure (I-21) : Chute de résistance d'un ciment ternaire (cas d'un HCL).

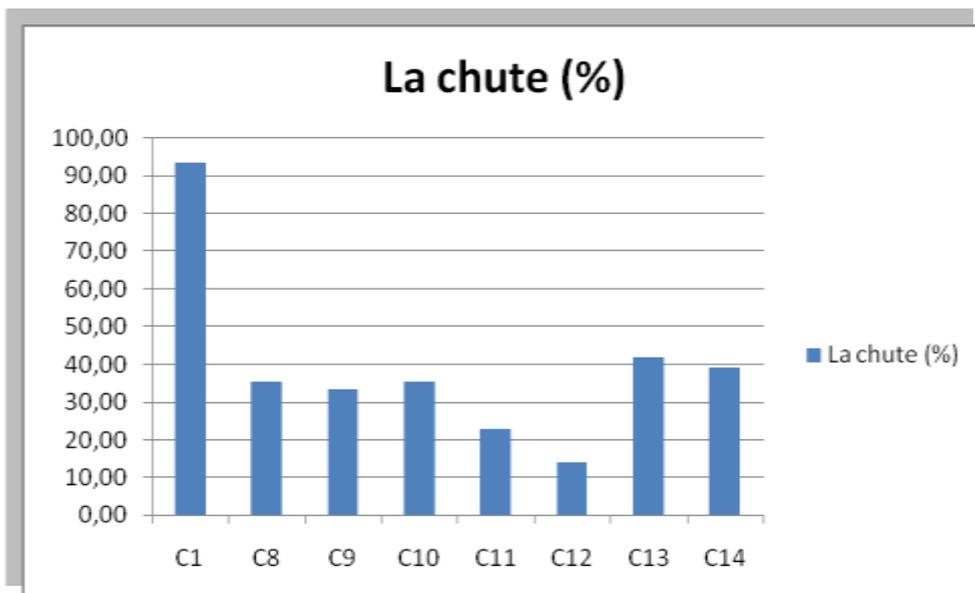


Figure (I-22) : Chute de résistance d'un ciment quaternaire (cas d'un HCL).

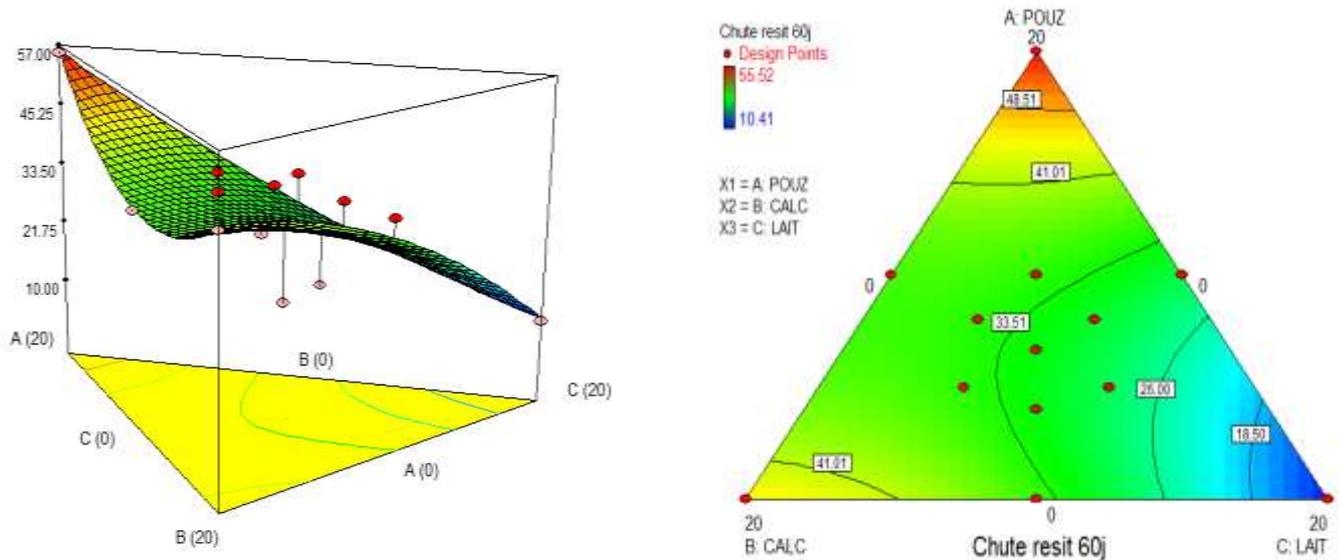


Figure (I-23) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la chute de résistance à 60 j (HCL).

D'après les résultats on remarque que la chute de résistance est faible dans le milieu agressif avec un acide HCL comparativement au milieu agressif avec H₂SO₄ ou la chute est plus élevée.

Pour l'acide HCL on remarque clairement que la chute la plus faible est marquée pour un mortier avec un ciment binaire avec laitier ou des ciments ternaire en présence du laitier donc le laitier améliore la résistance dans milieu avec HCL de 70% comparativement au ciment témoin sans ajouts.

En revanche la chute est élevée pour un ciment binaire avec la pouzzolane et le calcaire ce qui conduit à une résistance moins pour la pouzzolane mais sa demeure toujours proche comparativement au ciment sans ajouts.

✓ *La perte de masse d'un mortier milieu (H2SO4)*

Tableau (I-9) : la perte de masse d'un mortier (cas d'un H2SO4).

Ciment	5j	9j	22j	60j	Perte(%)	perte(%)	perte(%)	Perte(%)	
	M(g)	M1(g)	M2(g)	M3(g)	M4(g)	(5j)	(9j)	(22)	(60j)
C1	610	583.5	541.5	499.5	431	4.34	11.22	18.11	29.34
C2	595	572.5	553.5	509	468.5	3.78	6.97	14.45	21.26
C3	605	554.5	511	457	395	8.34	15.53	24.46	34.71
C4	607	558	591	413.5	373	8.07	19.11	31.87	38.55
C5	617	587	511	428	363.5	4.78	17.17	30.63	41.1
C6	608	575.5	496	424	368	5.34	18.42	30.26	39.47
C7	615	553	482.5	482.5	352	10.08	21.54	21.54	42.76
C8	607	531.5	476	425	376.5	12.34	21.58	29.98	37.97
C9	617	558	518.5	456.5	411.5	9.56	15.96	26.01	33.3
C10	608.75	579.5	522	462.5	413.5	4.8	14.25	24.02	32.07
C11	616.75	584.5	548	486.5	426.5	5.22	11.14	21.11	30.84
C12	613.75	568	532.5	466.5	421	7.45	13.23	23.99	31.4
C13	609.25	563.5	531	454.5	414	7.5	12.84	25.4	32.04

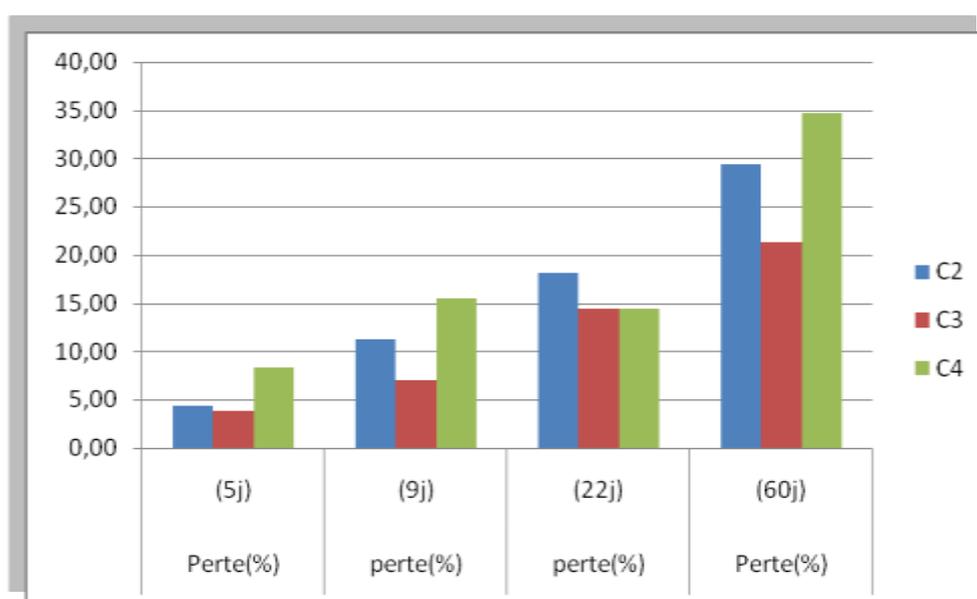


Figure (I-24) : la perte de masse d'un ciment binaire (cas d'un H2SO4).

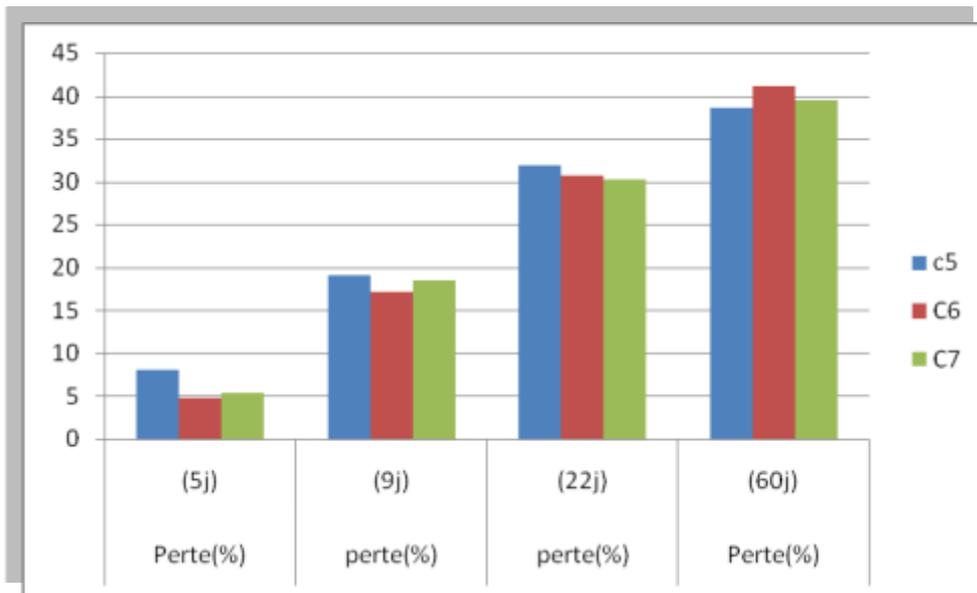


Figure (I-25) : la perte de masse d'un ciment ternaire (cas d'un H2SO4).

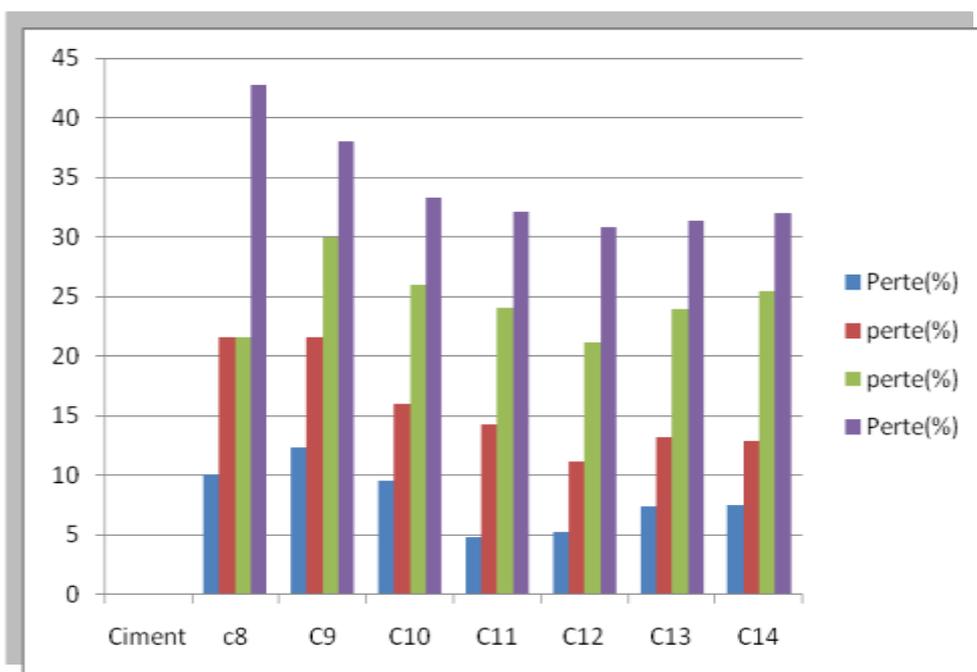


Figure (I-26) : la perte de masse d'un ciment quaternaire (cas d'un H2SO4).

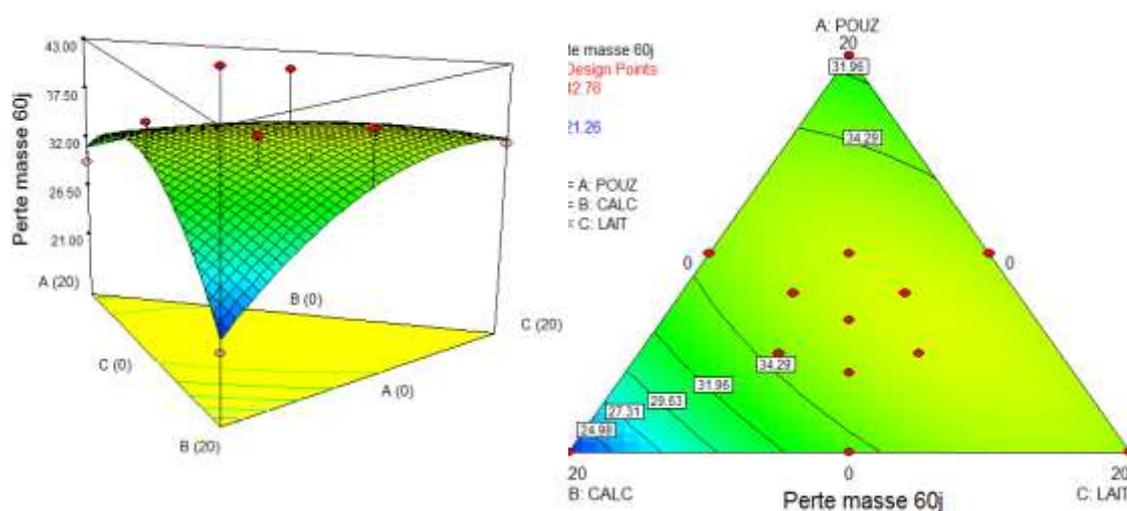


Figure (I-27) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la perte de masse à 60 j (H2SO4).

✓ *La perte de masse de mortier milieu HCl*

Tableau (I-10) :la perte de masse d'un mortier (cas d'un HCL).

ciment	5j	9j	22j	60j	Perte(%)	perte(%)	perte(%)	Perte(%)	
	M(g)	M1(g)	M2(g)	M3(g)	(5j)	(9j)	(22)	(60j)	
C2	610	598.5	594	597.5	587	1.88	2.62	2.04	3.77
C3	595	572.5	562	564	549.5	3.78	5.54	5.21	7.64
C4	605	593.5	589.5	591.5	583.5	1.9	2.56	2.23	3.55
C5	607	571	561	562.5	546	5.93	7.57	7.33	10.04
C6	617	600	596.5	598.5	585	2.75	3.32	2.99	5.18
C7	608	594.5	591	592.5	579	2.22	2.79	2.54	4.76
C8	615	586	580	581.5	572	4.71	5.69	5.44	6.99
C9	607	590	585	588	579	2.8	3.62	3.13	4.61
C10	617	592	479	591	587	4.05	22.36	4.21	4.86

C11	608.75	579.5	465	576.5	572.5	4.8	23.61	5.29	5.95
C12	616.75	590	478	591	587.5	4.33	22.49	4.17	4.74
C13	613.75	574.5	457.5	570	559.5	6.39	25.45	7.12	8.83
C14	609.25	571.5	456	566.5	557	6.19	25.15	7.01	8.57

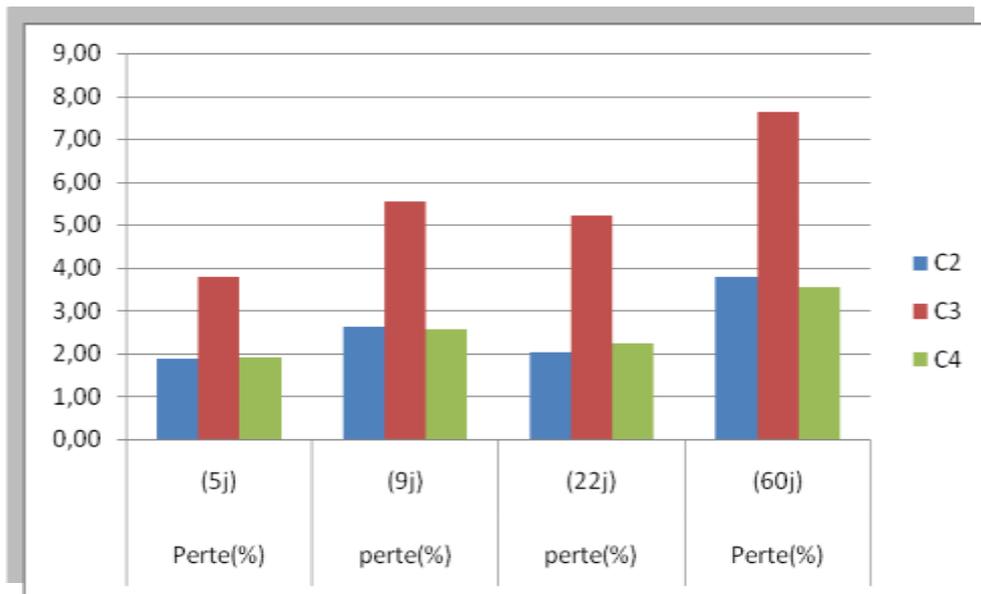


Figure (I-28) : perte de masse d'un ciment binaire (cas d'un HCL).

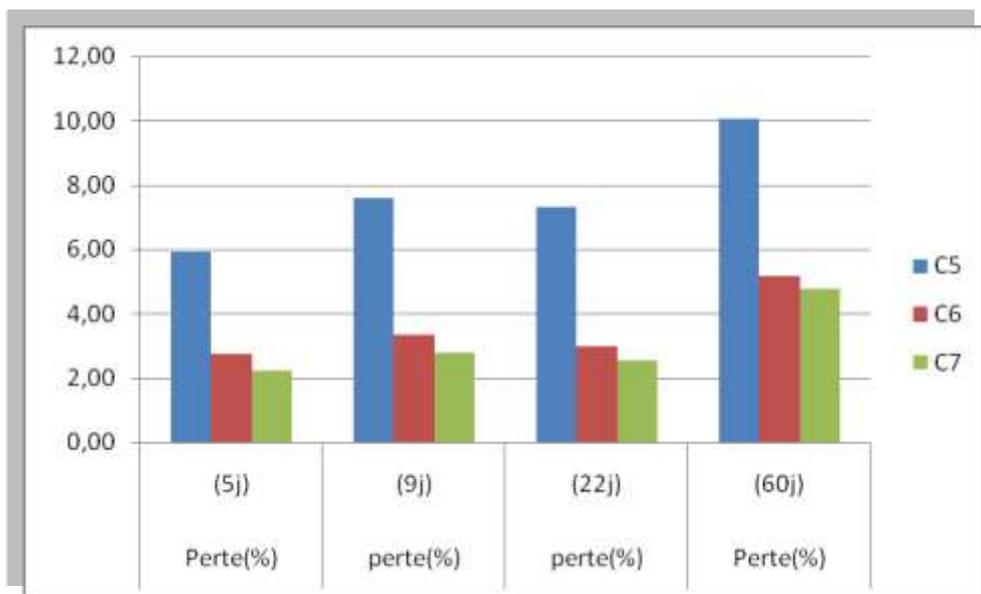


Figure (I-29) : perte de masse d'un ciment ternaire (cas d'un HCL).

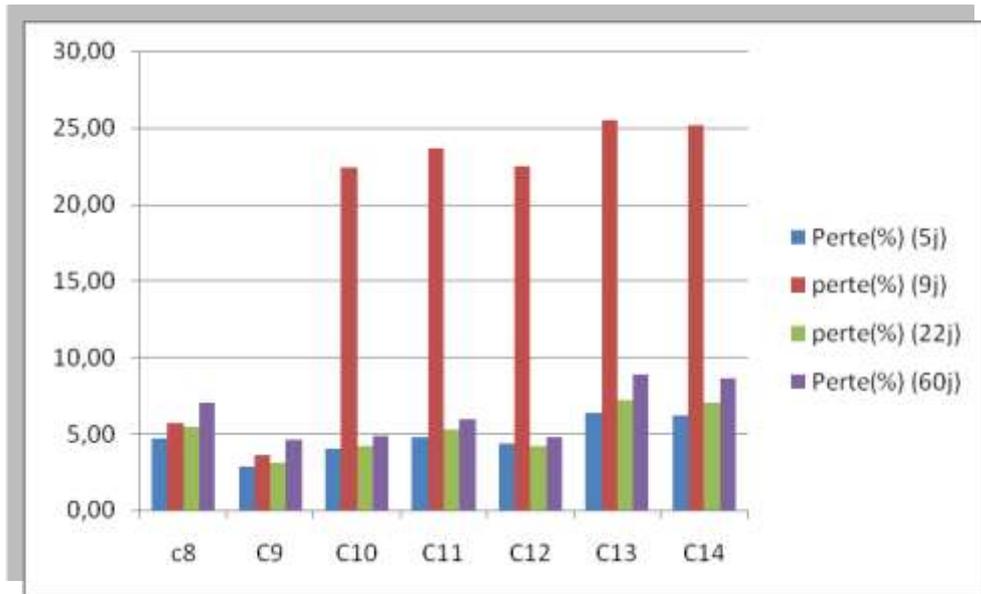


Figure (I-30) : perte de masse d'un ciment quaternaire (cas d'un HCL).

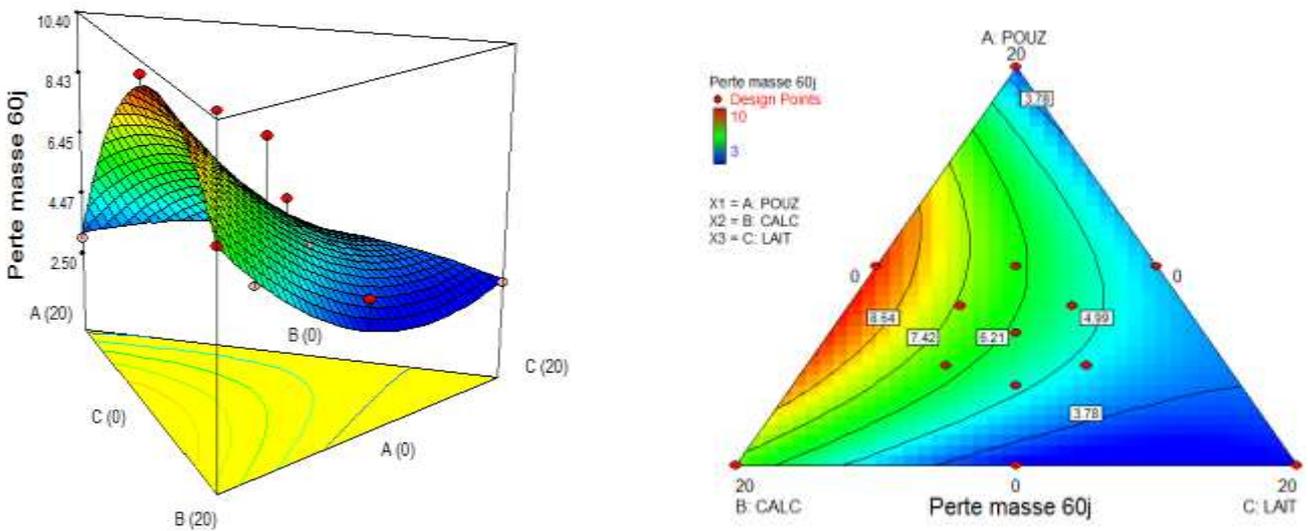


Figure (I-31) :Surface de réponse et diagramme triangulaire de la perte de masse à 60 j (HCL)

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- La perte de masse évolue dans le temps, une perte de 10.08 à 5 jours atteint un max à 60j. 42.76 au milieu H₂SO₄ 04 % et une perte à 5 jours de 5.90 qui atteint 10.4 à 60j au milieu HCL.
- La perte de masse est son évolution est très importante dans un milieu agressif avec un acide H₂SO₄ comparativement au milieu agressif avec HCL avec un différentiel de 70% .

- Le ciment binaire avec calcaire montre une bonne résistance à la perte de masse dans un milieu agressif de H_2SO_4 et le ciment binaire et ternaire avec laitier et la pouzzolane sont moins résistants à la perte de masse dans le même milieu.
- Le ciment binaire avec laitier offre une meilleure résistance à la perte de masse dans un milieu agressif de HCl ainsi la pouzzolane montre une bonne résistance mais moins que celle d'un laitier est la perte demeure faible dans les ciments avec laitier et pouzzolane est une perte importante avec les ciments calcaire pouzzolane.

Conclusion générale

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

✓ le comportement mécanique 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 a 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 a 28 jours confirmé par une résistance (compression ou flexion) a 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 les milieux agressifs on remarque clairement que la chute de résistance est la perte de masse est plus élevée dans les milieux avec un acide H₂SO₄ qui parut très agressif comparativement au milieu HCL

✓ Pour la durabilité du mortier testé dans un milieu agressif , on remarque un rôle meilleur du ciment binaire avec calcaire et pouzzolane dans la contribution de l'amélioration de la durabilité confirmé par sa bonne tenue a 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 rôle dans la durabilité on

négligeant en revanche le laitier a montré une bonne tenue à la chute de résistance dans le milieu HCL.

En conclusion finale de ce travail, nous pouvons dire que les ajouts peuvent contribuer à l'amélioration de la résistance dans les milieux agressifs et leur utilisation séparément pour les ciments binaire ou en combinaison pour les ciments ternaire et quaternaire peut influencer positivement le comportement du mortier du point de vue performance mécaniques et durabilité outre l'avantage de valorisation des déchets cimentaires.

Perspectives

En perspectives nous proposons d'étudier :

- ✓ L'influence de la composition chimique des ajouts sur la durabilité des mortiers.
- ✓ Influence de la finesse des ajouts sur le comportement et durabilité des mortiers.

Les index

I. INDEXE DES FIGURES

Intitulée	Page
PARTIE.I. Synthèse bibliographique	
Figure (I-1) : Schéma générale du processus de fabrication du ciment	5
Figure (I-2) : clinker	7
Figure (I-3) : image de gypse par le MEB	9
Figure (II-1) : Image en MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite	13
Figure (II-2): Micrographie de clinker montrant ses principales phases cristallines	14
Figure (III-1): Laitier	20
Figure (IV-1) : mécanique de carbonatation au niveau de la solution interstitielle du béton	32
PARTIE. II. Etude expérimental	
Figure (II-1): Principe de fonctionnement du permiabilimètre de Blaine.	61
Figure (II-2): Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.	64
Figure (II-3): Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	67
Figure (II-4): Dispositif de rupture en compression.	67
Figure (III-1) : Courbe granulométrique du sable normalisé.	70
PARTIE III : résultats et interprétation	
Figure (I-1): le rapport E/C pour préparer Les pates.	76
Figure (I-2): début de prise des pates	78
Figure (I-3): fin de prise des pates	78
Figure (I-4) : perte de masse d'un ciment binaire.	80

Figure (I-5) : perte de masse des d'un ciment ternaire.	80
Figure (I-6) : perte de masse d'un ciment quaternaire.	81
Figure (I-7) : Surface de réponse et diagramme triangulaire de la perte de masse à 60 j (HCL).	81
Figure (I-8) : la résistance à la compression d'un ciment binaire.	83
Figure (I-9): la résistance à la compression d'un ciment ternaire.	83
Figure (I-10) : la résistance à la compression d'un ciment quaternaire.	84
Figure (I-11) : surface de réponse et diagramme triangulaire de la résistance à la compression à 28 j.	84
Figure (I-12) : la résistance à la flexion d'un ciment binaire.	86
Figure (I-13) : la résistance à la flexion d'un ciment ternaire.	86
Figure (I-14) : la résistance à la flexion d'un ciment quaternaire.	87
Figure (I-15) : surface de réponse et diagramme triangulaire de la résistance à la flexion à 28 j.	87
Figure (I-16) : chute de résistance d'un ciment binaire (cas d'un H ₂ SO ₄).	88
Figure (I-17) : chute de résistance d'un ciment ternaire (cas d'un H ₂ SO ₄).	89
Figure (I-18) : chute de résistance d'un ciment quaternaire (cas d'un H ₂ SO ₄).	89
Figure (I-19) : surface de réponse et diagramme triangulaire de la chute de résistance à 60 j (H ₂ SO ₄).	90
Figure (I-20) : chute de résistance d'un ciment binaire (cas d'un HCL).	91
Figure (I-21) : chute de résistance d'un ciment ternaire (cas d'un HCL).	92
Figure (I-22) : chute de résistance d'un ciment quaternaire (cas d'un HCL).	92
Figure (I-23) : surface de réponse et diagramme triangulaire de la chute de résistance à 60 j (HCL).	93
Figure (I-24) : la perte de masse d'un ciment binaire (cas d'un H ₂ SO ₄).	94
Figure (I-25) : la perte de masse d'un ciment ternaire (cas d'un H ₂ SO ₄).	95
Figure (I-26) : la perte de masse d'un ciment quaternaire (cas d'un H ₂ SO ₄).	95
Figure (I-27) : surface de réponse et diagramme triangulaire de la perte de masse à 60	96

j (H ₂ SO ₄).	
Figure (I-28) : perte de masse d'un ciment binaire (cas d'un HCL).	97
Figure (I-29) : perte de masse d'un ciment ternaire (cas d'un HCL).	97
Figure (I-30) : perte de masse d'un ciment quaternaire (cas d'un HCL).	98
Figure (I-31) : surface de réponse et diagramme triangulaire de la perte de masse à 60 j (HCL).	98

II.INDEXE DES TABLEAUX

Intitulée	Page
PARTIE.I. Synthèse bibliographique	
Tableau (I.1) : Composition minéralogique moyenne du clinker.	7
Tableau (I.2) : Les 5 types de ciments courants et leur composition.	10
Tableau (I.3) : la résistance de chaque classe à la compression.	10
Tableau (III.1) : composition chimique du laitier et du ciment portland.	21
Tableau (III.2) : l'effet d'ajouts sur le ciment.	24
Tableau (III.3) : l'utilisation des ajouts en Algérie	26
PARTIE. II. Etude expérimental	
Tableau (I.1) : tableau de la matrice des expériences (plan de mélange).	52
Tableau (II.1) : méthodes d'essais normalisés en Europe.	56
Tableau (II.2) : les lieux de réalisations des essais.	57
Tableau (II.3) : principe de préparation de la pate	63
Tableau (III.1) : la masse volumique et SSB des composants.	69
Tableau (III.2) : la composition chimique du clinker et d'ajouts.	69
Tableau (III.3) : les résultats obtenus concernant les analyses physico chimiques de l'eau.	71
PARTIE.III. résultats et interprétation	

Tableau (I-1): La Surface spécifique Blaine et la masse volumique de chaque type de ciment.	74
Tableau (I-2): La Variation de La consistance normale des ciments étudiés.	76
Tableau (I-3): Evolution du temps de prise (début et la fin) des ciments étudiés.	77
Tableau (I-4): La perte de masse des pates (%).	79
Tableau (I-5) : La résistance mécanique à la compression.	82
Tableau (I-6) : La résistance mécanique à la flexion.	85
Tableau (I-7) : La chute de la résistance (cas d'un H ₂ SO ₄).	88
Tableau (I-8): La chute de la résistance. (Cas d'un HCL).	91
Tableau (I-9): la perte de masse d'un mortier (cas d'un H ₂ SO ₄).	94
Tableau (I-10): la perte de masse d'un mortier (cas d'un HCL).	96

III-INDEXE DES PHOTOS

Intitulée	Page
PARTIE. II. Etude expérimental	
Photo (I.1) : le clinker avant le concassage.	50
Photo (I.2) : le gypse après broyage.	51
Photo (I.3) : le laitier après le broyage.	51
Photo (I.4) : le calcaire après le broyage.	51
Photo (I.5) : la pouzzolane après le broyage.	52
Photo (I.6) : le séchage des ajouts.	52
Photo (I.7) : concasseur d'Ain-Kebira.	53
Photo (I.8) : le broyeur d'Ain-Kebira.	53
Photo (I.9) : sable normalisé.	55
Photo (I.10) : acide H₂SO₄	56
Photo (I.11) : acide HCL	56
Photo (II-1) : pates normalisées	64
Photo (II-2) : mortier préparé	67
Photo (II-3) : des éprouvettes après 9j d'immersion	70
Photo (II-4) : mesure du ph des mortiers	70
Photo (II-5) : mesure du ph des pates	70

Référence

- [1] : Ciments calcia les technodes 78930 guerville www.ciments-calcia.fr
- [2] : CNRS. Prévention du risque chimique, [en ligne].
www.prc.cnrs.gif.fr/documents/grand_public/ciment_environnement.htm
- [3] : Auteurs Holcim Western Europe Materials & Applications Center 1ère édition 2007.
- [4] : IFIPS. Le béton : accueil, [en ligne]. <http://lebeton.free.fr/ciment.html>
- [5] : R. SERSALE, “Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI- 17ème Congrè International de la chimie des ciments - Volume 1- Paris 1980.
- [6] :Stutzman, P.(2004) Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure, cement and concrete composites, 26 : 957-966.
- [7] : Thèse de doctorat en science préparé par AMOURI Chahinez *Soutenue le 2009*.
- [8] : Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de LICENCE préparé par Nabila BOUALLA Université des sciences et de la technologie d'Oran - Licence 2011.
- [9] : J.Thiebaut et al (1988 et 1992) ,Encyclopedia Universalis (Gypse) Livret Guide Pyrénées Centrales.R.Mirouse (Masson).
- [10] : J. Baron – JP. Olivier et J.C.Weiss : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles – 806p-1997.
- [11] : F.ROUESSAC & A.ROUESSAC, « analyse chimique : méthodes et techniques instrumentales modernes »,4ème Edition, Dunod, Paris, 1998.
- [12] : M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [13] : L. PLISKIN : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.

- [14] : ADAMM-NEVILLE, Propriétés des bétons, Édition Eyrolles 2000, pp 7,9,10.
- [15] : REGOURD M., HORNAIN H. – « Applications de la microscopie électronique à balayage ». *Revue des matériaux de construction*, n° 693, 1975, p. 73-87.
- [16] : Regourd M., L'hydratation du ciment Portland, Le béton hydraulique, Paris, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, p. 193-221, 1982.
- [17] : Le Chatalier.
- [18] : Michaelis.
- [19] : Romilliat E., Étude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker. Thèse de Doctorat Université Jean Monnet de Saint-Etienne (2006) 136p.
- [20] : Regourd M., Microstructure et propriétés des ciments, mortiers et bétons, Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, n° 1/82-734, p. 41-49, 1982.
- [21] : Maggion R., Étude bibliographique sur l'hydratation et la structure du ciment, Centre de recherche sur les solides à organisations cristalline imparfaite, France, 1989.
- [22] : 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.
- [23] : MIDGLEY H.G. AND ILLSTON J.M, « The penetration of chlorides into hardened - ciment pastes, *Cem, Concr, Res* », 1984, 14, 4, 546-558.
- [24] : BIJEN J. PROF. DR, « Blast furnace slag ciment », 1996.
- [25] : Manai K., Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [26] : Baron J et al. Le béton hydraulique (connaissance et pratique) ; Presses de l'école

nationale des Ponts et Chaussées, France, 1995.

[27]: H. Weigler, S. Karl “ Béton : arten -herstellung -eigenschaf-ten” Verlag Ernest and Sohn,Berlin, pp 383-404 – 1989.

[28] : Mémoire présenté par DJOBO YANKWA Jean Noël *Matricule* : 06T087 Licencié en chimie 2013.

[29] :A.AITCIN « les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de construction, Mai 1968.

[30] : Maggion R., Etude bibliographique sur l’hydratation et la structure du ciment, Centre de recherche sur les solides à organisations cristalline imparfaite, France, 1989.

[31] : GROUPE CEMENTS LUXEMBOURGEOIS, Séminaire – BETON 2001: Journée d’information technique 23 novembre 2001 Carlo KIRPACH.

[32] : Mémoire présenté et soutenu publiquement en vue de l’obtention du Diplôme de Master en chimie Spécialité : Chimie Inorganique Option : Physico-Chimie des Matériaux Minéraux Par : DJOBO YANKWA Jean Noël *Matricule* : 06T087 Licencié en chimie, Année 2013.

[33] : S.KHADRAOUI, « Etude des caractéristiques d’un ciment ternaire avec ajouts laitier pouzzolane ». Mémoire de fin d’étude master 2, université de BBA.2011.

[34] : BEHIM, M,(1987) utilisation du laitier granulé d’EL-Hadjer pour la fabrication des ciments, thèse de magister, université de Annaba-Algérie.

[35] : Venuat M., La pratique des ciments et des bétons, Edition du Moniteur, Paris, p. 75-224, 1976.

[36] : M Venuat-la pratique des ciments, mortiers et bétons –Tome 1 : « caractéristiques des liants et bétons, mise oeuvre des coulis et mortiers » édition2.1989.

- [37] :F.Adenot “ Durabilité du béton: caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment ” These de doctorat, Université d’Orléans – 1992.
- [38] : C. Carde R. François et J.M Torrenti. “Leaching of both calcium hydroxyde and C-S-H from cement paste: modelling the mechanical behaviour”. Cement and Concrète Research, pp 1257-1268-
- [39] : Mounir .B. Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux. Mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf de M’sila, Algérie (2008) 101p.
- [40] : Desarnaud E., Ando S., Desbarbieux T., Prebay Y., Atelier Changement Climatique ; Les enjeux du développement durable au sein de l’Industrie du Ciment : réduction des émissions de CO2. (2006) 45p.
- [41] : A. M. Neville “ Propriétés des bétons” édition Eyrolles, Paris, pp. 463-506 -2000.
- [42] : Mohamed SALHI*1, Mohamed GHRICI2, 1 *ENSET d’Oran, BP 1523 El-M’naouer, Oran, Algérie* 2 *Université de Chlef, BP 151 Hay Es-salam, Chlef, Algérie.*
- [43]: Mokhtaria BENKADDOUR(1), Fatiha KAZI AOUAL(1)
(1) Laboratoire <<LABMAT>>, Département Génie Civil, Ecole Normale Supérieure d’Enseignement Technique (ENSET Oran), B.P. 1523 Oran El M’Naouer 31000, Algérie
mimi070784@yahoo.fr, fkaziaoual@yahoo.fr 64 Revue Nature et Technologie. n° 01/Juin 2009.
- [44]: Yassine SENHADJI 1, Mohamed MOULI 2, AbdelHamid. KHELAFI 1, Ahmed Soufiane BENOSMAN 3
(1) Faculté d’architecture et de génie civil, laboratoire LMST/ UST Med Boudiaf d’Oran.Algérie
(2) Département de génie civil, Ecole Normale Supérieure d’Enseignement Technique BP 1523 ; El M’naouar, Oran 31000 ; Algérie
(3) Faculté des sciences, laboratoire de chimie des polymères, Université d’Oran Es Senia BP 1524 ; El M’naouar, Oran 31000 ; Algérie
- [45] : Dr Ibrahim massaoudane, cours de 2^{ème} année master 2014/2015.

[46] : ANDRIAMANANTSILV.N.R .2003 COMPORTEMENT du matériaux cimentaires dans un coffrage .expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation, thèse de doctorat, 2003 à l'université de bretagne sud .

[47] : Chercheur à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR, ex-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), il est un spécialiste de la durabilité des matériaux à base de ciment.

[48] : la durabilité des bétons auteur « jean-pierre ollivier , angélique vichot ».

[49] : [Touzain, 1996] S. TOUZAIN « Etude de la structure des dépôts calcomagnésiens formés en présence d'écoulements. Application à la protection cathodique en milieu marin ». Thèse de Doctorat, Université La Rochelle, 1996.

[50] : K. Krenkler “ Chemie des bauwesens ” tome I : anorganische chemie, springer- Verlag, Berlin, pp : 346-380 -1980.

[51] : S. Mansour “ Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires ” Mémoire de Magister – Université SAAD DAHLEB – BLIDA – 2003.

[52] : 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.

[53]: 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.

[54]: 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.

[55] : « LABORATOIRE MATERIAUX CEBTP - SAINT-REMY-LESCHEVREUSE ” Annexe technique I à la convention d'accréditation N° 1-0002 du 01/02/2006 , accrédité par la Section Laboratoires du COFRAC pour son unité technique.

[56] : BERATEST AG SUISSE/SWITZERLAND, Ciment Mortier, disponible sur site web <http://www.beratest.com/catalog/francais/pdf/0060.pdf> (consulte le 10/06/2006).

[57] : HUGUETTE BRUNET, GOVERNMENT OF CANADA, Ajouts cimentaires Date Published: 2003-10-24, disponible sur site web <<http://scm.gc.ca/indexf.html> >, (Consulte le 12/04/2006)

[58] : R.DUPAIN, R.LANCHON,J-C.SAINT ARROMAN, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition casteilla2004 PP,17-25.

[59] : NASR-EDDIN KEDJOUR, laboratoire du béton, office de publication universitaire 2003.

[60] : Mémoire de fin d'étude préparé par BENGRINE ZAKARIA et NAFNAF ASSAM .2013.