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

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° D'ORDRE : H……. /2012

MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE: GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX ET DURABILITE DES CONSTRUCTIONS

THEME

Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse

Présenté Par

BELBACHIR NASRINE

Soutenue le devant la commission d'examen:

Président:	
-HIMOURI Slimane	Professeur Université de Mostaganem
Rapporteur:	
-SEMCHA Abdélaziz	M.C.A ENSET Oran
Examinateurs:	
-BELAS Nadia	Professeur Université de Mostaganem
-BOUHAMOU Nasr-eddine	M.C.A Université de Mostaganem

Je dédie ce travail,

à mes parents et à toute ma famille qui m'ont soutenu non seulement durant la préparation de ce travail, mais aussi dés le premier jour que j'ai vu la lumière de ce monde,

à mes amis et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment,

à tous ceux qui aiment et respectent le droit du savoir.

REMERCIEMENTS

La présente étude à été réalisée au sein du Département de Génie Civil de l'Université de « ABDELHAMID IBN BADIS » de Mostaganem

Je tiens à remercier :

Monsieur SEMCHA ABDELAZIZ, Maître de conférences, pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques ainsi que pour sa rigueur scientifique, pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour ce travail qu'il a guidé par de judicieux conseils, qui a bien su me communiquer pour mener au mieux cette étude

Monsieur HIMOURI SLIMANE, Maître de conférences Président de jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Madame BELAS NADIA, Professeur pour l'honneur qu'elle m'a fait d'être examinateur de ce travail et je tiens à lui exprimer ma grande satisfaction pour la stricte et bénéfique formation durant toute l'année théorique.

Monsieur BOUHAMOU NASR-EDDINE, Maître de conférences pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail et je tiens à lui exprimer ma grande satisfaction pour la stricte et bénéfique formation durant toute l'année théorique.

J'exprime ma profonde gratitude à tous le personnel du laboratoire de la cimenterie de ZAHANA.

Pour tout le monde, merci infiniment.

Résumé

Les sédiments issus des opérations de dragages posent de nombreux problèmes environnementaux et économiques liés à leur devenir. Dans la prise en charge des retombées nuisibles de ces déchets, il est nécessaire de les gérer par des mesures de valorisation dans plusieurs domaines.

L'objectif principal de cette étude rentre dans le cadre de valorisation de la vase issue des opérations dragage du barrage de Fergoug comme un substituant au ciment. Le travail consiste à étudier les propriétés mécaniques à court terme d'un béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse, cette dernière est élaborée à partir d'un traitement thermique de la vase.

La première étape consiste à vérifier les propriétés pouzzolaniques de la vase calcinée. En seconde étape nous avons caractérisé les matériaux utilisés dans notre recherche (sable, gravier, ciment, l'eau). Notre contribution a porté sur la vérification et la confirmation des acquis en matière de résistance et de comportement à court terme de bétons confectionnés à partir de ciment composé de pouzzolane de synthèse à base de vase de barrage calcinée. Ces propriétés ont été mises en évidence par des essais de compression, traction (traction par flexion et fendage) et de retrait (endogène et de dessiccation). Trois variantes de béton ont été étudiées : béton à base de ciment portland artificiel, béton à base de pouzzolane de synthèse (Vase calcinée) et un autre à base de pouzzolane naturelle de Béni-Saf. L'incorporation des ajouts dans le ciment a été par une substitution de 20%.

L'étude a montré d'une part que la vase issue du barrage de Fergoug calcinée a acquis des propriétés pouzzolaniques et d'autre part, cette activité pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, aussi que les résistantes mécaniques pour le béton avec ciment portland artificiel sont meilleures. Toutefois à partir de 28 jours les performances étudiées se rapprochent nettement de celles des témoins à base de ciment seul, d'où l'intérêt de la substitution d'une fraction non négligeable de vase traitée au ciment. Ce travail vient confirmer des résultats antérieurs relatifs à l'amélioration des performances mécaniques des ciments pouzzolaniques à long terme.

Mots Clés :

Valorisation, vase calcinée, propriétés mécaniques, propriétés pouzzolaniques, jeune âge, substitution.

ملخص

إن الترسبات الناتجة عن عمليات تجريف السدود تطرح مشاكل بيئية واقتصادية كبيرة، في إطار التخلص من الآثار السلبية لهذه النفايات تأتي ضرورة تسييرها واستغلالها في عدة مجالات.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة يدخل في إطار استغلال الطين الناتجة عن عمليات التجريف لسد فرقوق (معسكر) كاستبدال لنسبة من الاسمنت.

هذا العمل ينصص على دراسة الخصائص الميكانيكية على المدى القصير لخرسانة مشكلة من اسمنت بوزولاني اصطناعي هذا الأخير يتحصل عليه عن طريق معالجة حرارية للطين .

أول مرحلة تنص على التأكد من الخصائص البوزولانية للطين المحروقة و في المرحلة الثانية يتم تعريف المواد المستعملة في هذه الدراسة من رمل زلط واسمنت.

المتغيرات الثلاثة التي تمت دراستها هي خرسانة ذات اسمنت بورتلندي اصطناعي بدون إضافة، خرسانة ذات اسمنت مدموج مع بوزولان اصطناعي (طين محروقة) وأخرى ذات اسمنت مدموج مع بوزولان طبيعي، دمج هذه الإضافات يتم عن طريق استبدال 20 بالمائة من الاسمنت.

أثبتت الدراسة من جهة أن الطين المستخرجة من سد فرقوق اكتسبت خصائص بوزولانية بعد معالجتها حراريا ومن ناحية أخرى النشاط البوزولاني ليس غالبا في المدى القصير كما أن المقاومات الميكانيكية للخرسانة ذات الاسمنت البورتلندي الصناعي هي الأفضل.

بداية من 28 يوم الخصائص المدروسة تقترب من الخرسانة المعيارية أين نجد أهمية استبدال نسبة معتبرة من الطين المعالجة هذا العمل يؤكد النتائج السابقة المتعلقة بتحسين الأداء الميكانيكي للاسمنت البوزولاني على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية:

الاستغلال، الطين المحروقة، الخصائص الميكانيكية، الخصائص البوزولانية، المدى القصير، الاستبدال.

Abstract

Sediments stemming from operations of dredgings raise numerous environmental and economic problems bound to their future. In the framework of disposal from negative effect to this waste, it is necessary to manage them by measures of valorization in several domains.

The main objective of this study brings in within the framework of valorization of the mud stemming operations dredging of the dam of Fergoug as a substituting in the cement. The work consists in studying the short-term mechanical properties of a concrete with pouzzolanique cement of synthesis, this last one is elaborated from a heat treatment of the mud.

The first stage consists in verifying the pouzzolaniques properties of calcined mud. In second stage we characterized materials used in our search (sand, gravel, cement, the water). Our contribution concerned the check and the confirmation of the experiences in resistance and in short-term behavior of concretes made from cement consisted of pozzolana of synthesis with calcined mud of dam. These properties were revealings by essays of compression, tension (tension by flexion and fendage) and of shrinkage (endogenous and of dehydration).

Three concrete variants were studied: concrete with cement portland artificial, concrete with pozzolana of synthesis (calcined Mud) and the other one with natural pozzolana of Béni-Saf. The incorporation of the additions in the cement was by a substitution of 20 %.

The study showed on one hand that the mud stemming from the dam of calcined Fergoug acquired pouzzolaniques properties and on the other hand, this pouzzolanique activity is not dominant at the eraly age, as well as the resistant mechanics for the concrete with cement artificial portland are better.

However from 28 days the studied performances get closer sharply to those of the witnesses with only cement, where from the interest of the replacement of a important fraction of mud treated in the cement. This work comes to confirm previous results relative to the improvement of the mechanical performances of cements pouzzolaniques at long-term.

Key words:
Valorization, calcined mud, mechanical properties, pouzzolaniques properties, early age, Substitution.

Sommaire

Resumé
ملخص
Absract
Introduction Générale …… 15
Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux cimentaires
I-1 -Le ciment Portland …….…….. 18
I-1-1-Le ciment portland artificiel (CEM I) ……..…….. 18
I-1-1-2- Composition chimique du clinker ……..…… 18
I-1-1-2- Les Principaux minéraux du Clinker ……..……..…….. 19
I-1-2-Le ciment portland composé (CEM II) ……..…….. 20
I-1-2-1-Constituants principaux des ciments ……..…… 21
I-1-2-1-1-Laitier granulé de haut-fourneau (S) ……..……. 21
I-1-2-1-2-Cendres volantes (V et W) ……..……. 22
I-1-2-1-3-Pouzzolanes naturelles (Z) ……..……..…….. 22
I-1-2-1-4-Schistes calcinés (T) ……..…….. 23
I-1-2-1-5-Calcaires (L) ……..…….. 23
I-1-2-1-6-Fumées de silice (D) ……...……...……. 23
I-1-3-Principe de fabrication des ciments courants ……..……. 23
I-1-3-1-Extraction ……..……...……. … 24
I-1-3-2-Concassage ……..…….. 24
I-1-3-3-Préparation du cru ……..……. 24
I-1-3-4- Préhomogénéisation ……..……. 25
I-1-3-5-Broyage-séchage …… 25
I-1-3-6-Séparation ……..……. 25
I-1-3-7-homogénéisation …… 26
I-1-3-8- Cuisson ……..……. 26
I-1-3-9- Refroidissement ……...……...…… …. 27
I-1-3-10-Broyage ……...……...…….. 27
I-1-4-Différents types de ciments courants ……...……. 28
I-1-5- Performance des ciments ……..……. 30
I-1-6- Composition chimique des minéraux ……..……..…..... 31
I-2- Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires ……. 32
I-2-1 -Hydratation du ciment ……...……..……. 32

I-2-1-1 -Equations ……..…….. 32
I-2-1-2 -Chaleur d'hydratation ……..……...…… 35
I-2-2 -Notion de seuil de percolation ……..…..... 38
I-2-3- Déformations au jeune âge …….…….. 40
I-2-3-1 Déformations endogènes …… 40
I-2-3-1-1 Retrait chimique (contraction Le Châtelier) ……...……....40
I-2-3-1-2 Retrait thermique ……..……40
I-2-3-1-3 Retrait d'autodessiccation ……....……40
I-2-3-2 Facteurs influençant le retrait endogène ……..41
I-2-3-2-1 Influence du rapport E/C …… 41
I-2-3-2-2 Influence de la nature et de la finesse du ciment ……...……..42
I-2-3-2-3 Influence de l'adjuvant ……..... 42
I-2-3-2-4 Influence de la température ……..... 42
I-2-4- Retrait de séchage ……..……... 44
I-3-Microstructure de béton durci ……..… .44
I-3-1-Structure des hydrates de ciment ……..……..…….. 44
I-3-2- Porosité ……..…… 44
I-3-3-Zone de transition ……..... 45
I-3-4-développement mécanique du matériau ……...…… … 47
Chapitre II : Etude bibliographique sur les pouzzolanes
II-1-La pouzzolane …….. 49
II-1-1-Historiques des pouzzolanes …… 49
II-1-1-1-Dans le monde ……... 49
II-1-1-2-En Algérie ……. 50
II-1-2-Pouzzolane naturelle …… 50
II-1-2-1- Matériaux d'origine volcanique …….. 50
II-1-2-2- Matériaux d'origine sédimentaire …… 51
II-1-2-3-Matériaux d'origine mixte …… 52
II-1-3-Pouzzolane artificielle …….. 53
II-1-3-1-Cendre volantes ……. 53
II-1-3-2-Argiles, Schistes, Terres de diatomées torréfiées ……. 53
II-1-4-Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes ……. 53
II-1-5- Activité pouzzolanique …… 55

II-1-5-1-Estimation de l'activité pouzzolanique …… 55
II-1-5-2-Nature des hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique …… 55
II-1-5-2-1-Hydratation des ciments aux pouzzolanes ……..... 55
II-1-6- Comportement de La pouzzolane …… 57
II-1-6-1-A l'état frais …….. 57
II-1-6-2-A l'état durci ……. 57
II-2-La vase ……. 58
II-2-1-Définition et origine des sédiments …… 58
II-2-2 Problème d'envasement ……... 58
II-2-3 Gestion des boues de dragage …….. 59
II-2-4 Débouchés potentiels en valorisation …….. 60
II-2-5- Valorisation dans le génie civil ……60
II-2-6-Valorisation de la vase dans les ciments pouzzolaniques ……60
II-2-6-1-La Calcination ……....61
II-2-6-1-1-La calcination flash ……61
II-2-6-1-2 La calcination lente……..62
II-3-Citation de quelques recherches ……..…….62

Chapitre III : Expérimentation

III-1-Caractéristiques des matériaux utilisés ……..……70
III-1-1- Le Ciment portland artificiel ……..…….70
III-1-1-1- Composition chimique …… 70
III-1-1-2- Caractéristiques physique ……..……..70
III-1-1-2-Composition minéralogique ……...…….....71
III-1-2- Les ajouts minéraux ……..…….. 71
III-1-2-1 -Vase ……..……... 71
III-1-2-1-1-Préparation de la vase ……...……71
III-1-2-1-2-Composition chimique ……..72
III-1-2-1-3-Caractéristiques physiques……72
III-1-2-1-4-Composition minéralogique ……..72
III-1-2-1-4-1-Diffraction au rayon X ……...72
III-1-2-1-5-Analyse granulométrique……...73
III-1-2-1-6-Limites d'Atterberg ……..……...…….74
III-1-2-1-7-Vérification des propriétés pouzzolaniques de la vase calciné ……75

III-1-2-2 –Pouzzolane naturelle……...……75
III-1-2-2-1 -Composition chimique …….……....75
III-1-2-2-2-Caractéristiques physiques……...……..76
III-1-2-2-3- Analyse minéralogique ……..……...76
III-1-2-2-4- Analyse granulométrique ……...…..…....77
III-1-2-2-5- Vérification des propriétés pouzzolaniques de la pouzzolane naturelle ……...78
III-1-3- Les granulats …….……..78
III-1-3-1-Caractéristiques physiques ……79
III-1-3-1-1-Sable ……..79
III-1-3-1-1-1-Masse volumique absolue ou masse spécifique ……..……..79
III-1-3-1-1-2-Masse volumique apparente ou masse volumique ……..……..79
III-1-3-1-1-3-Equivalent de sable ……79
III-1-3-1-1-4-Module de finesse……...80
III-1-3-1-1-5-La porosité ……....80
III-1-3-1-2-Les pierres concassées (gros granulats) ……80
III-1-3-1-2-1-Masse volumique absolue ou masse spécifique ……80
III-1-3-1-2-2-Masse volumique apparente ……..80
III-1-3-1-2- Coefficient d'absorption des graviers utilisés ……...…..…81
III-1-3-2-Caractéristiques chimiques ……...……. 81
III-1-3-2-1-Composition chimique de sable de carrière ……...……..81
III-1-3-2-2-Composition chimique de sable de mer ……..…….... 83
III-1-3-3-Analyse granulométrique (tamisage à sec) …….....83
III-1-3-3-1-Analyse granulométrique de sable ……..…….85
III-1-3-3-2-Analyse granulométrique des granulats utilisés ……...……86
III-1-4- L'eau de gâchage ……. …….....87
III-2 Méthodes d'essais …….…….…….88
III-2-1 Essai sur le ciment anhydre ……...……..…… 88
III-2-1-1-La masse volumique absolue ……...…….. 88
III-2-1-1-1- Objectif de l'essai ……...……..... 88
III-2-1-1-2-Conduite de l'essai …….…….. 88
III-2-1-2-Mesure de la finesse du ciment ……...…..……89
III-2-1-2-1- Objectif de l'essai ……..……. 89
III-2-1-2-2- Principe de l'essai …….…….. 90

III-2-1-2-3- Equipement nécessaire utilisé ……..……. 90
III-2-1-2-4-Conduite de l'essai …….……. 90
III-2-2-Essais sur la pate de ciment …….……..….... 91
III-2-2-1-Essai de consistance …….……... 91
III-2-2-1-1-Objectif de l'essai ……...……..…… 91
III-2-2-1-2- Principe de l'essai …….…….. 91
III-2-2-1-3- Equipement nécessaire utilisé ……...…….. 91
III-2-2-1-4- Conduite de l'essai ……...……...…… 92
III-2-2-2-Essais de prise ……...……..…… 93
III-2-2-2-1- Objectif de l'essai ……...……..…. 93
III-2-2-2-2-Principe de l'essai …….……... 93
III-2-2-2-3-Equipement nécessaire utilisé ……...…….. 93
III-2-2-2-4-Conduite de l'essai …….……. 94
III-2-3 Essai mécanique sur le béton …….. 94
III-2-3-1 Essai de compression ……...…….. 94
III-2-3-1-1-Principe de l'essai …….……... 95
III-2-3-1-2-Expression des résultats …….……..….. 95
III-2-3-2 Essai de traction …….……..... 95
III-2-3-2-1 Essai de traction par flexion …….…..…….. 95
III-2-3-2-1-1-Expression des résultats …….……..…... 96
III-2-3-2-2-Essai de traction par fendage …….... 97
III-2-3-2-2-1-Expression des résultats ……...……... 98
III-2-3-3-Essai de retrait ……..……...… 98
III-2-3-3-1- Principe de l'essai …….…….. 99
III-2-3-3-2-Expression des résultats …….……... 99
III-2-4 Composition de béton …….……... 100
III-2-4-1 Dosage en ciment et en eau …….…….. 100
III-2-4-2 Ajustement du dosage en eau ……...…. 102
III-2-4-3-Courbe granulaire de référence ……..... 103
Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et interprétation
IV-1-Analyse des propriétés des ciments …….…….. ...106
IV-1-1-Composition des mélanges étudiés …….…… 106
IV-1-2 Influence des ajouts sur le poids spécifique et la finesse du ciment …….…… ... 106

IV-1-3 Influence de l'ajout pouzzolanique sur la pate de ciment ……..……..... 107
IV-1-3-1 Influence des ajouts sur la consistance et la prise ……..... 107
IV-2- Analyse des propriétés des Bétons ……...…. 108
IV-2-1-Influence des ajouts sur la résistance à la compression ……...…….……... 108
IV-2-2 Influence des ajouts sur la résistance à la traction …….……... 110
IV-2-2-1-Résistance à la traction par flexion …….…….... 111
IV-2-2-2-Résistance à la traction par fendage …….……..….112
IV-2-3-Influence des ajouts sur le retrait ……. 113
IV-2-4-Influence des ajouts sue la Perte de masse ……....116
Conclusion générale ……...……..…… 117
Références Bibliographiques ……...……..……...….. 119

Liste des figures

Titre **Page**

Figure-1-Cheminement dans le four ……...…… 27

Figure-2-Stade de fabrication du ciment …… 28

Figure-3- Développement of strength of pure compounds ……... 32

Figure-4- Illustration of the hydration of a single grain of Portland cement …….…... 34

Figure-5-Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment après le contact E/C ……... 36

Figue-6-Microstructure d'une pate de ciment après 3 jours de durcissement…. …….. 37

Figure-7- Illustration de la création d'un chemin de percolation entre phase solides ……. 38

Figure-8- Illustration de la propagation des ondes accoustiques dans e béton avant le seuil de percolation (a) et après la création d'un chemin de percolation (b) …….. 39

Figure-9- Influence du rapport E/C sur :a)l'autodessication, b) le retrait endogène, b) le retrait endogène …… 41

Figure-10- Evolution du retrait endogène au cours du temps ……. 43

Figure-11- Cracking pattern in normal-strength concrete ……... 46

Figure-12- Features of the transition zone at the paste-aggregate interface ……...…..…..… 46

Figure-13- Barrage de Fergoug ……..…… 59

Figure-14- Température du four en fonction du temps ……..…… 62

Figure-15-Courbe DRX de la vase de Fergoug ……..... 73

Figure-16- Courbe granulométrique de la vase ……...… 74

Figure-17-Diffractogramme x de la pouzzolane de béni-saf …….……..... 77

Figure-18-Courbe granulométrique de pouzzolane ..…….…..... 77

Figure-19- Analyse granulométrique du sable corrigé ……..……. 85

Figure-20-Courbes granulométriques des granulats utilisés …….. 86

Figure-21- Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine ……..… 89

Figure-22- Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance ……..... 92

Figure-23- Principles of flexural testing ……. 96

Figure-24- Bending diagrams for center-point loading ……... 96

Figure-25- L'essai de fendage ……..….... 97

Figure-26-Dispositif de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage …….……... 97

Figure-27- Eprouvette issue de l'essai de fendage après rupture ……. 98

Figure-28- Dispositif de l'essai retrait ……. 99
Figure-29 - Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment
à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée ……. 101
Figure-30-Essai d'étalement ……..… 102
Figure-31- Courbe granulométriques des granulats utilisés et de référence ……... 104
Figure-32-Résistance à la compression des bétons en fonction du temps …… 109
Figure-33-Résistance à la traction par flexion des bétons en fonction du temps …… 111
Figure-34-Résistance à la traction par fendage des bétons en fonction du temps ……... 112
Figure-35- Evolution du retrait endogène ……... 114
Figure-36- l'évolution du retrait Total …… 114
Figure-37- Evolution de retrait de dessiccation …….. 115
Figure-38- Evolution de la perte de masse ……. 116

Liste des tableaux

Titre **Page**

Tableau 1-Exemple de composition chimique d'un clinker …….. 18

Tableau 2-Les constituants et les additions du ciment …… 21

Tableau 3-Les différents types de ciments courants……... 29

Tableau-4- Microstructure élémentaire des quatre minéraux …….. 31

Tableau-5-Analyse chimique de quelques pouzzolanes volcaniques…….. 51

Tableau-6-Analyse chimique de quelques pouzzolanes riches en Silice …..…… 52

Tableau-7-Composition chimique de CPA ……..……..…….. 70

Tableau-8-Caractéristique physique de CPA…….…….. 70

Tableau-9-Composition minéralogique des clinkers selon la formule de Bogue …….. 71

Tableau-10- Composition chimique de la vase …….. 72

Tableau-11-Caractéristique physique de la vase ……..……... 72

Tableau-12- Analyse granulométrique au laser de la vase ……..……... 74

Tableau-13-Limites d'Atterberg de la vase ……..……. 75

Tableau-14- Composition chimique de pouzzolane …… 76

Tableau-15-Caractéristique physique de la pouzzolane……... 76

Tableau-16- Analyse granulométrique de pouzzolane …….…... 78

Tableau-17- Analyse chimique de sable de carrière ……... 82

Tableau-18- Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar …….. 83

Tableau-19- Analyse chimique et minéralogique de l'eau de gâchage utilisée ……..... 87

Tableau-20- Correction en pourcentage sur le dosage en eau …….. 102

Tableau-21- Composition des bétons ……..... 104

Tableau-22- Composition des mélanges étudiés ……..……. 106

Tableau-23- Poids spécifique des ciments préparés ……..... 106

Tableau-24-Consistance pour chaque composition de pate …….. 107

Tableau-25-Début et fin de prise des ciments préparés ……..... 107

Introduction Générale

Les barrages sont soumis au cours de leur exploitation à une réduction de la capacité de retenue au fur et à mesure que les sédiments se déposent, il est indispensable alors d'effectuer des opérations de dragage pour l'enlèvement de ces sédiments. Généralement les sédiments dragués sont relargués directement dans le cours d'eau à l'aval du barrage ou transportés jusqu'à la zone de dépôt la plus proche.

Ces déchets, vue l'importance de leur volume, constituent un problème majeur pour l'environnement, car ils sont de nouveau soumis à l'érosion. S'agissant de particules très fines, elles sont transportées au gré des courants et se déposent sur les lits et les berges des oueds, colmatant et imperméabilisant ainsi les zones d'infiltration.

Par ailleurs, le ciment est un matériau de construction très important en Algérie comme dans le monde entier pour la réalisation des bâtiments. L'Algérie connait un déficit en matériaux cimentaires et l'exploitation de la vase pour la fabrication des matériaux de construction peut donc s'avérer utile. Il existe de nombreuses voies de valorisation de cette vase : matériau de remplissage, de remblaiement, couche d'assise de chaussée, béton, brique…

La valorisation dans le béton offre une certaine liberté selon la granulométrie, le choix des quantités à substituer et le type de matériau à substituer (liant ou granulat). Dans notre travail, la vase est valorisé en tant que substituant au clinker après un traitement thermique (calcination à 750 °C).
La valorisation de la vase comme un substituant de clinker présente les avantages suivants :
- élimination et valorisation d'un déchet ;
- réduction de la consommation thermique (énergie de combustible) et
- réduction des émissions de CO_2.

Les objectifs recherchés : Le principal objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la pouzzolane de synthèse (vase calcinée) sur les propriétés mécanique à court terme du béton.

Ce travail présente une analyse expérimentale des propriétés physico-chimique du ciment de synthèse et la réponse mécanique du béton confectionné avec ce ciment ainsi que les changements volumétriques (retrait endogène et de dessiccation).

La méthodologie adoptée : Le manuscrit s'articule autour des points suivants :

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique sur les matériaux cimentaires. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les ciments, les ajouts minéraux, l'hydratation des ciments, propriétés des bétons, retrait, etc.

Le deuxième chapitre est destiné à l'étude bibliographique sur les pouzzolanes naturelles et artificielles. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les pouzzolanes, l'activité des pouzzolanes, valorisation de la vase, traitement thermique de la vase, etc.

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie la caractérisation des matériaux utilisés (vase, pouzzolane, ciment portland artificiel et sable) et les méthodes d'essais réalisés sur les ciments préparés et les bétons.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Chapitre I

Etude Bibliographique

Sur Les Matériaux Cimentaires

I-1 -Le ciment Portland :

I-1-1-Le ciment portland artificiel (CEM I) :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux. [Brocard.J 72]

I-1-1-1- Composition chimique du clinker :

De fait, la chimie des ciments est essentiellement une chimie des oxydes, et c'est ce qui justifie les conventions d'écriture qui lui sont propres. (Tableau 1) [Baron.J,Olivier.J.P et Weiss.J.C 99]

Tableau 1-*Exemple de composition chimique d'un clinker*

Oxydes	**Notation**	**Pourcentage**	**Marge d'erreur**
Perte au feu	-	1,08	±0,05
SiO_2	S	21,1	±0,1
Al_2O_3	A	5,11	±0,05
Fe_2O_3	F	3,31	±0,05
TiO_2	-	0,21	±0 ,01
MnO	-	0,04	±0,01
CaO	C	65,5	±0,2
MgO	M	1,31	±0,03
SO_3	S	0,93	±0,02
K_2O	K	1,02	±0,02
Na_2O	N	0,21	±0,02
P_2O_5	-	0,04	±0,01
SrO	-	0,08	±0,01

I-1-1-2- Les Principaux minéraux du Clinker :

- silicate tricalcique également dénommé « alite », C_3S, dont la formule est 3CaO, SiO_2 ;
- silicate bicalcique ou « bélite », C_2S, de formule 2CaO, SiO_2 ;
- aluminate tricalcique C_3A, de formule 3CaO, $A1_2O_3$ et
- alumino-ferrite tétracalcique C_4AF, de formule 4CaO, $A1_2O_3$, Fe_7O_3 (Le ciment Portland contient au moins 95 % de clinker).

Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases sont en moyenne de : 50 à 70 % pour le C_3S ; 5 à 25 % pour le C_2S ; 2 à 12 % pour le C_3A; 0 à 15 % pour le C_4AF.

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases, c'est ainsi que :

• le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C_2S, donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.

• Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.

• L'aluminate tricalcique C_3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale. Elle est par ailleurs facilement attaquée par les sulfates.

• L'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF, qui forme une solution solide de C_2A et C_2F, réagit moins vite que C_3A : son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

• de la chaux libre dont le pourcentage ne doit pas excéder 2% dans le clinker pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau ;

• de l'oxyde de magnésium MgO, encore appelé périclase, qui, non combiné, peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

De ce qui précède, il ressort qu'un ciment contenant par exemple 60 % de C_3S ainsi qu'un pourcentage en C_3A supérieur à 10 %, présentera de fortes résistances initiales et pourra être avantageusement utilisé par temps froid, alors qu'un ciment dont le pourcentage en C_3S est supérieur à 40 % et celui en C_3A n'excède pas 5 %, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé par temps chaud. [Festa.J et Dreux.G 98]

I-1-2-Le ciment portland composé (CEM II) :

Les ciments portland composés contient au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a par convention [Baron.J, Olivier J.P et Weiss.J.C 99] :

(Clinker) + (autres constituants) + (constituants secondaires) = 100.

Le ciment est le résultat du broyage d'un certain nombre de constituants qui peuvent se répartir en différentes familles : (tableau 2)

- Le clinker Portland.
- Le régulateur de prise.
- Les additions :

-Les additions hydrauliques.

-Les additions pouzzolaniques.

-Les fillers inertes.

Suivant sa composition chimique il aura des propriétés différentes. Le clinker réagit avec l'eau pour développer son potentiel hydraulique. Ces réactions doivent être tempérées par le régulateur de prise, généralement un sulfate de calcium (gypse ou anhydrite). Des additions sont parfois utilisées pour des raisons économiques, pour leur potentiel hydraulique latent, ou pouzzolanique (naturelle ou artificielle).

Tableau 2-*Les constituants et les additions du ciment [Festa.J , Dreux.G 98]*

Ciment Portland		**Les additions**			
Clinker	**Régulateur De prise**	**Hydraulique**	**Pouzzolane**	**Inerte**	**Additifs**
	-Gypse Anhydrite	-Laitier de haut fourneau -Cendres volantes de lignite	-Cendres Volantes -Argile Calcinée -Fumée de silice	-Filler calcaire Ou siliceux	-Agent de broyage -Adjuvants

La fabrication de ciment à teneur réduite en clinker, implique l'utilisation des composants minéraux peu coûteux permettant d'économiser le combustible énergétique lors de la fabrication, et de limiter ainsi l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère environnante.

Une augmentation de la production de ce type de ciment à faible teneur en clinker requiert cependant une étude systématique des différents composants entrant dans la composition des liants. Ainsi, la nature et la quantité des ajouts minéraux peuvent modifier les processus d'hydratation et les hydrates formés. De même, les propriétés mécaniques et la durabilité des composés obtenus.

I-1-2-1-Constituants principaux des ciments :

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques et physiques. On appelle « constituant principal », un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5% en masse. La lettre entre parenthèse qui suit leur dénomination, est leur désignation abrégée [Dupain.R 00].

I-1-2-1-1-*Laitier granulé de haut-fourneau (S) :*

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre

de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

I-1-2-1-2-*Cendres volantes (V et W) :*

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être :

- siliceuses (V), auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est à dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation ;

- ou calciques (W), auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes siliceuses (V) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

I-1-2-1-3-*Pouzzolanes naturelles (Z) :*

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer.

I-1-2-1-4-*Schistes calcinés (T) :*

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800 °C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés.

I-1-2-1-5-*Calcaires (L) :*

Les calcaires utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, c'est à dire lorsqu'ils représentent plus de 5 % de la masse totale du ciment, doivent présenter une proportion de carbonate de calcium $CaCO_3$ supérieure à 75 % en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit au plus de 1,20 g pour 100 g et une teneur en matières organiques (TOC) au plus égale à 0,5 %.

I-1-2-1-6-*Fumées de silice (D) :*

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Elles doivent contenir au moins 85 % de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes. [Festa.J, Dreux.G 98]

I-1-3-Principe de fabrication des ciments courants :

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20 %.

Le calcaire apporte le calcium; l'argile apporte la silice SiO_2, l'alumine $A1_20_3$ et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 nécessaires au processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésie MgO, des sulfates, des sulfures, des alcalis K_2O et Na_2O..., dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises.

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

I-1-3-1-Extraction :

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues-pelles avant d'être transportée par camions.

I-1-3-2-Concassage :

Les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières allant jusqu'au m^3, le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100 mm au maximum. Les matériels utilisés à cette fin peuvent être mobiles, ou fixes.

I-1-3-3-Préparation du cru :

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile, peut se faire suivant différents procédés, le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

- 65 % de CaO fourchette de 60 à 69 %,
- 21 % de SiO_2 fourchette de 18 à 24 %,
- 6 % de $A1_2O_3$ fourchette de 4 à 8 %,
- 3 % de Fe_2O_3, fourchette de 1 à 8 %,
- 2 % de MgO fourchette de 0 à 5 % maximum,
- 1 % d'alcalis fourchette de 0 à 2 % maximum,

- 1 % de $S0_3$ fourchette de 0 à 3 % maximum,

Ces proportions permettant de prévoir certaines des qualités ultérieures du ciment.[Festa.J, Dreux.G 98]

La préparation du cru peut être réalisée suivant quatre procédés différents :

- *La voie humide :* ce procédé ancien est, d'une façon générale, remplacé par la voie sèche. Le remplacement est réalisé dans les pays industrialisés depuis vingt à trente ans sauf exception. Ce procédé est en effet parfois encore utilisé, dans les pays industrialisés, pour incinérer des déchets industriels et agricoles.

- *Les voies semi-humide et semi-sèche :* ces technologies, utilisées il y a une trentaine d'années, présentaient l'avantage d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide.

- *La voie sèche :* Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés.)

La fabrication par voie sèche, comporte les phases suivantes :

I-1-3-4- ***Pré-homogénéisation :***

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de pré-homogénéisation ».

I-1-3-5-*Broyage-séchage :*

Repris à l'aide de roues-pelles ou de gratteurs, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grains inférieurs à 160 microns.

I-1-3-6-*Séparation :*

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à renvoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz.

I-1-3-7-Homogénéisation :

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit.

I-1-3-8- Cuisson:

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (de 150 m dans le procédé par voie humide), à une température comprise entre 1 400 et 1 500 °C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant ;
- la décomposition des argiles qui se situe au dessus de 500°C;
- la décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950 °C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000 °C et
- la formation du clinker ou clinkérisation à 1450 °C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur.

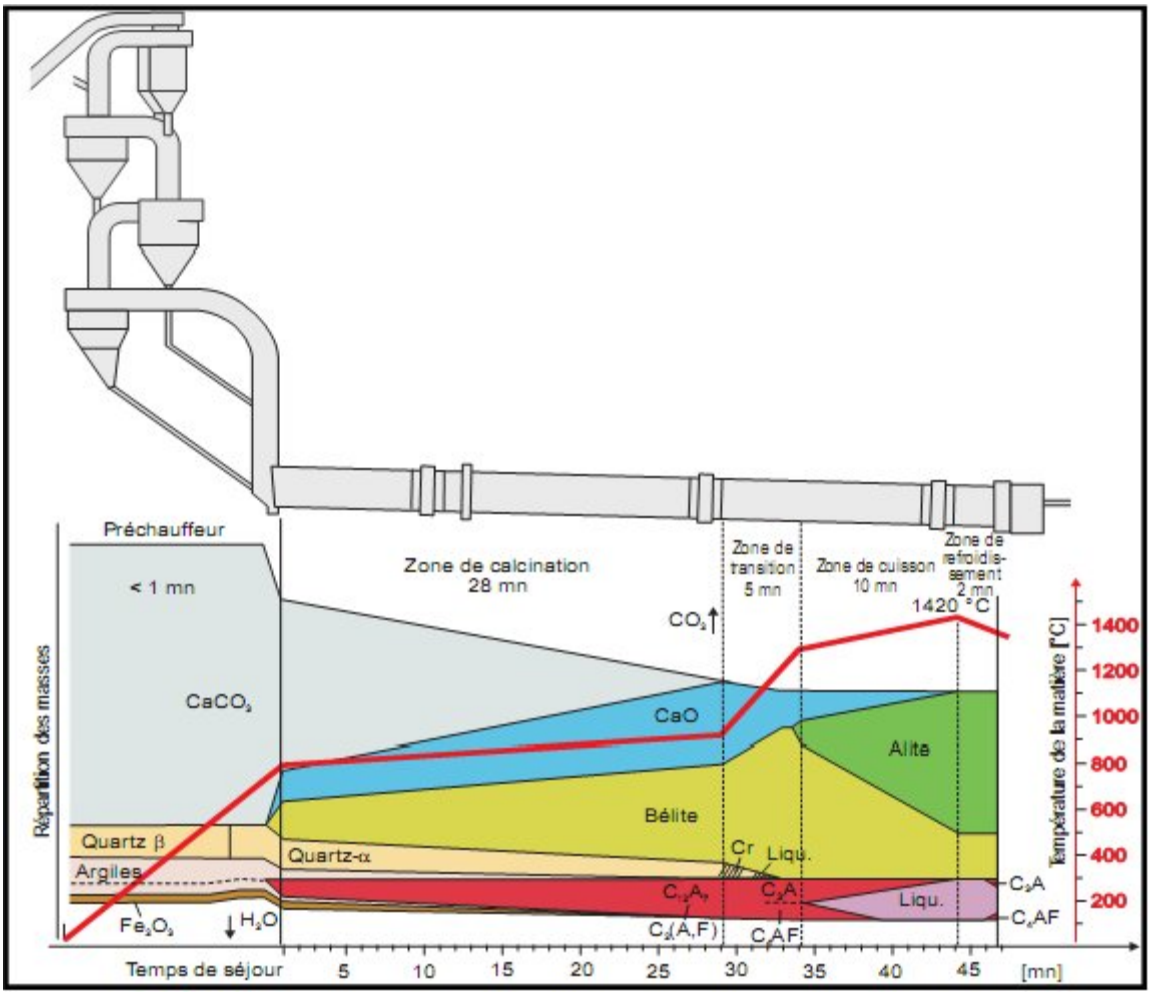


Figure-1-*Cheminement dans le four [Demaily.D 06]*

I-1-3-9- Refroidissement :

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50/250 °C suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C_3S en C_2S qui entraîne une baisse des résistances.

I-1-3-10-Broyage :

II est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi

qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

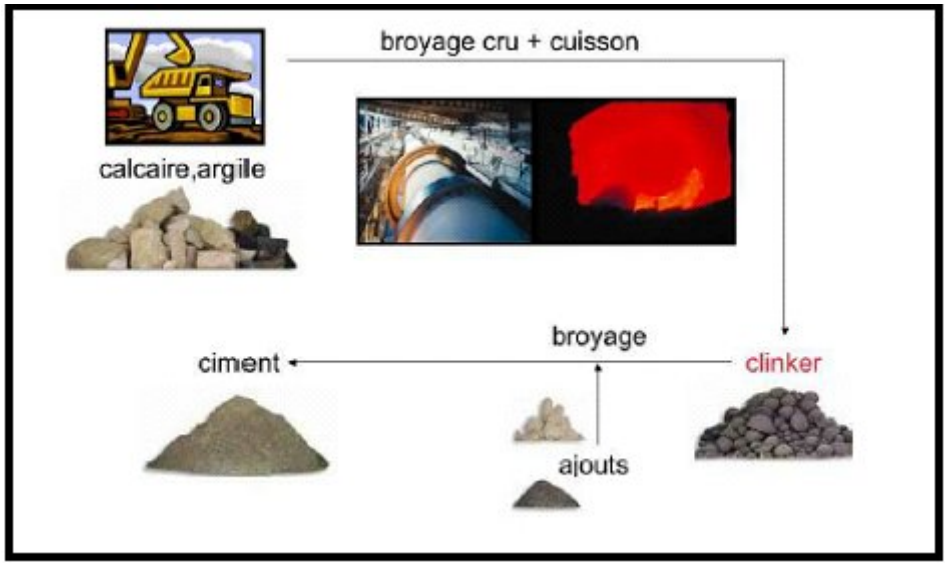


Figure-2-*Stade de fabrication du ciment [Demaily.D 06]*

I-1-4-Différents types de ciments courants :

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent. [Festa.J, Dreux.G 98]

Tableau 3-*Les différents types de ciments courants [Festa.J et Dreux.G 98]*

Désignations	**Types de ciments**	**Teneur en clinker**	**Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier -pouzzolanes - cendres -calcaires - schistes - fumées de silice**	**Teneur en constituants secondaires**
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94%	- de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % *(*) ;*	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %	- de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	- 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	- 66 à 80 *%* de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CLK-CEM III/C		5 à 19 %	- 81 à 95 *%* de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	-10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	-36 à 55 *%* comme ci-dessus	0 à 5 %
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	-18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 *%* de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC-CEM V/B		20 à 39 %	-31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

(*) Le pourcentage de fillers est limité à 5 %.

I-1-5- Performance des ciments :

Pour contrôler la qualité et la régularité de la fabrication du clinker à partir des oxydes dans les cimenteries. Certains modules ou indice chimiques sont nécessaires à calculer.

Module hydraulique de Michaelis (M_h) compris entre 1.7 et 2.3

$$= \frac{}{+ \quad +}$$

Module silicique de Kühl compris entre 1.5 et 5

$$= \frac{}{+}$$

Modules alumino -ferrique (Maf) de Kühl compris entre 1.5 et 2.5

$$= \frac{}{}$$

Indice d'hydraulicité de Vicat compris entre 0.4 et 0.5

$$= \frac{+}{+}$$

Les composés sont exprimés en moles et non en pour-cent.

Indice de saturation en chaux de Kühl compris entre 0.85 et 1

$$\frac{=}{2{,}8 \times \quad + 1{,}1 \times \quad + 0{,}7 \times}$$

Facteur de saturation de Lea Parker compris entre 0.85 et 1

$$(\quad) \frac{=}{2{,}8 \times \quad + 1{,}18 \times \quad + 0{,}65 \times}$$

C'est le rapport de la chaux (CaO) totale dans le mélange à la chaux susceptible de se combiner avec les autres oxydes (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O) plus le M_{sat} est élevé plus les résistances le sont aussi.

I-1-6- Composition chimique des minéraux :

Le Tableau-4 montre bien la microstructure élémentaire des quatre minéraux selon une analyse par microsonde électronique de casting : analyse élémentaire ponctuelle (les résultats sont donnés sous forme d'oxyde). **[**Barron.J, Sauterey.R 82**]**

Tableau-4- *Microstructure élémentaire des quatre minéraux.*

Oxyde	**C3S**	**C2S**	**C3A**	**C4AF**
CaO	74.2 ± 0.5	64.2 ± 0.6	57 ± 2.0	50.7 ± 0.5
SiO_2	24.5 ± 0.3	30.8 ± 0.8	4.4 ± 0.1	3.8 ± 0.2
Al_2O_3	1.6 ± 0.2	2.2 ± 0.4	25.2 ± 0.9	17.4 ± 0.6
Fe_2O_3	0.57 ± 0.07	0.63 ± 0.06	6.9 ± 0.6	18.5 ± 0.7
MgO	0.34 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.66 ± 0.01	1.96 ± 0.09
SO_3	0.30 ± 0.06	1.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.09 ± 0.04
K_2O	0.03 ± 0.01	0.3 ± 0.05	0.1 ± 0.04	0.03 ± 0.01
TiO_2	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.5 ± 0.1	2 ± 0.2

I-2- Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires :

I-2-1 -Hydratation du ciment :

I-2-1-1 -Equations :

Lorsque le ciment portland est mélangé avec de l'eau, il se produit plusieurs réactions chimiques qui sont plus ou moins rapides. Ces réactions font intervenir les différents constituants du ciment. Ce dernier est composé de quatre phases minéralogiques principales qui représentent 90% ou plus de la masse du ciment : le C_3S, le C_2S, le C_3A et le C_4AF.

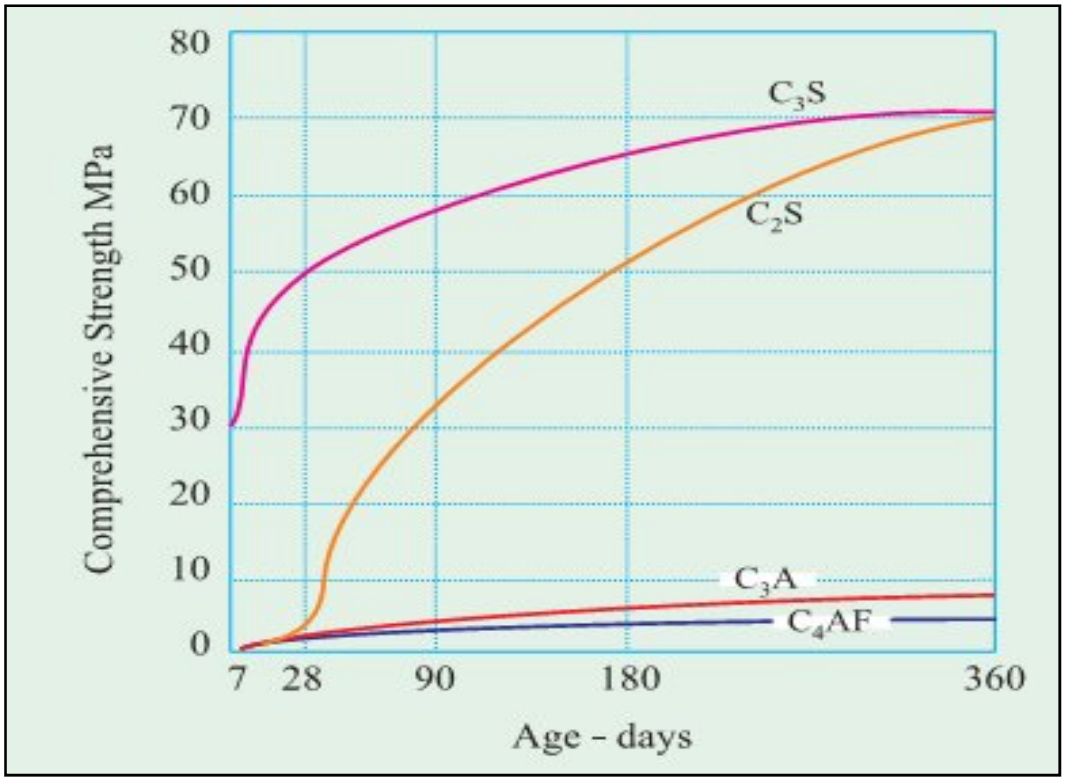


Figure-3- *Développement of strength of pure compounds [Shettty .M .S 05]*

Le silicate tricalcique (C_3S) est la phase la plus abondante du ciment. Elle représente entre 50 et 70% de la masse du ciment [Bjontegaard 99]. Le silicate tricalcique est aussi appelé alite. Lorsque celui-ci réagit avec l'eau, la réaction chimique est très rapide et les produits de la réaction durcissent rapidement. L'alite est en grande partie responsable de la prise et de la résistance initiale du béton. En général, plus la teneur en alite d'un béton de ciment portland est élevée, plus la résistance initiale est grande. L'équation de la réaction chimique est la suivante :

Alite + eau → silicate de calcium hydraté + hydroxyde de calcium

$$C_3S + 5{,}2H \rightarrow C_{1,7}SH_4 + 1{,}3CH$$

Les deux produits de la réaction chimique sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de l'hydroxide de calcium (CH). Les C-S-H forment la phase la plus abondante de la pate de ciment hydraté. Les C-S-H sont en fait une famille de produits mal cristallisés et ce sont eux qui contribuent à la résistance du matériau. Le CH, quant à lui, est communément appelé de la portlandite. C'est une phase cristalline soluble qui représente environ 20% du volume de la pate.

La deuxième phase du ciment anhydre est appelé bélite qui est en fait du silicate bicalcique (C_2S). Elle constitue entre 15 et 30% de la composition du ciment [Bjontegaard 99]. Tout comme l'alite, la bélite produit des CSH et du CH lorsqu'elle réagit avec l'eau. La réaction chimique est par contre beaucoup plus lente que celle de l'alite. La bélite contribue en grande partie à la résistance développée au-delà d'une semaine. L'équation de la réaction chimique entre la bélite et l'eau est la suivante :

Bélite + eau → silicate de calcium hydraté + hydroxide de calcium

$$C_2S + 4{,}3H \rightarrow C_{1,7}SH_4 + 0{,}3CH$$

L'aluminate tricalcique (C_3A) est la troisième phase du ciment. Elle constitue entre 5 et 10% de la composition du ciment [Bjontegaard 99]. Lors de la réaction chimique, le C_3A libère une grande quantité de chaleur durant les premières minutes de l'hydratation et il contribue légèrement à l'accroissement de la résistance initiale du matériau. La réaction chimique est plus compliquée que celle de l'alite et de la bélite puisqu'elle se réalise en deux étapes. Premièrement, le C_3A réagit avec l'eau et le gypse pour former de l'ettreingite(AFt). Une fois l'ettreingite formée, celle-ci réagit avec le C_3A toujours disponible pour former des monosulfoaluminates de calcium (ou AFm). Les deux équations chimiques sont les suivantes:

Etape 1 :

Aluminate tricalcique + gypse + eau → ettringite

$$C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$$

Etape 2 :

Aluminate tricalcique+ettringite+eau → monosulfoaluminate de calcium

$$C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$$

La dernière phase principale du ciment est l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF). C'est le produit qui résulte de l'utilisation des matières premières contenant du fer et de l'aluminium pour abaisser la température de la clinkérisation pendant la fabrication du ciment. L'hydratation du C_4AF est initialement assez rapide, mais elle s'arrête rapidement et contribue très peu à la résistance mécanique du béton. La plupart des effets de couleur du béton sont dus au C_4AF. La réaction chimique est la suivante :

aluminoferrite tétracalcique + hydroxyde de calcium+eau → aluminoferrite de calcium hydraté

$$4C_4AF + 2CH + 10H \rightarrow 6CA_2F_2H_{12}$$

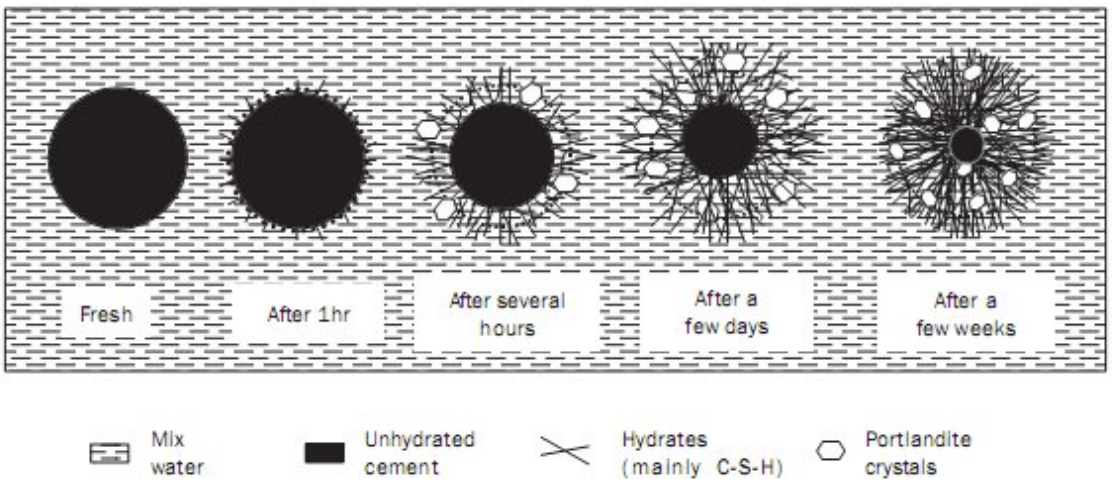


Figure-4- *Illustration of the hydration of a single grain of Portland cement. [Domone.P,Illuston.J 10]*

I-2-1-2 -Chaleur d'hydratation :

La réaction chimique entre le ciment et l'eau est très exothermique, c'est-`a-dire qu'elle dégage beaucoup de chaleur. Les deux phases minéralogiques principalement responsables de la quantité de chaleur dégagée sont le C_3A et le C_3S. La finesse, la teneur en ciment et la température de cure sont également d'autres facteurs qui peuvent influencer sur la quantité de chaleur produite.

Même si la réaction chimique dure très longtemps, la chaleur est principalement libérée pendant les premières heures suivant le contact de l'eau avec les grains de ciment. La température que le béton peut atteindre dépend principalement de l'épaisseur de la pièce coulée ainsi que les conditions d'isolation. Dans le cas d'ouvrages de petites dimensions comme une dalle de béton à faible épaisseur, le dégagement de chaleur ne cause pas de problème véritable puisque la chaleur est vite dissipée dans l'environnement. Dans le cas d'ouvrages massifs, tels les barrages, l'augmentation de la chaleur peut causer des problèmes majeurs. Si la température ne se dissipe pas rapidement, des contraintes de traction peuvent apparaitre en surface et endommager sérieusement l'ouvrage.

Tel que mentionné dans la section précédente, l'hydratation du ciment est un procédé qui implique plusieurs phases minéralogiques.

Etant donné que la vitesse de réaction varie selon les composantes, le processus d'hydratation se fait en cinq différentes étapes : la pré-induction, l'induction (période dormante), l'accélération, la décélération et la consolidation. La Figure-5 présente les cinq étapes ainsi qu'un exemple de courbe du dégagement de chaleur en fonction du temps écoulé depuis le contact E/C [Gardner.E.M, Gaidis.W.R 91]. Tout dépendamment de la phase minéralogique, le dégagement de chaleur peut changer d'intensité.

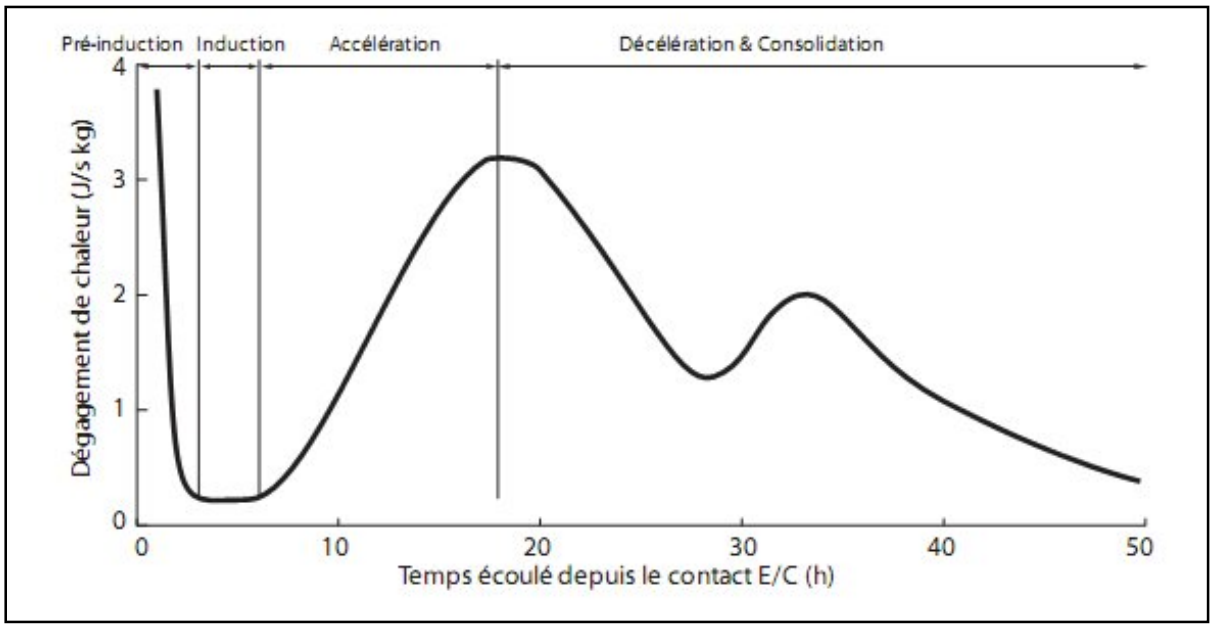


Figure-5-*Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment après le contact E/C [Gardner.E.M, Gaidis.W.R 91]*

La première étape de pré-induction correspond à la dissolution du C_3S et du C_3A dans la solution interstitielle. Plusieurs espèces ioniques (Ca_2^+ et OH^-) sont en solution à ce moment. Cette phase dure quelques minutes et elle est accompagnée d'une forte élévation de la température. Lors de cette étape, il y a formation d'une mince couche d'hydrates (épaisseur ≈ 1 nm) qui sert de protection pour les grains de ciment. Cette mince couche nuit à la dissolution ultérieure des grains, ce qui entraine la phase d'induction [Gardner.E.M, Gaidis.W.R 91]

Sur la Figure-5, on remarque que durant la seconde étape (induction), la chaleur d'hydratation est constante et très faible. La dissolution des composantes du ciment se produit toujours, mais elle se déroule à un rythme beaucoup plus lent. C'est durant cette période que le béton est maniable. Elle est de durée très variable et dépendante des ajouts utilisés dans le béton, certains d'entre eux permettent d'accélérer ou de retarder la prise.

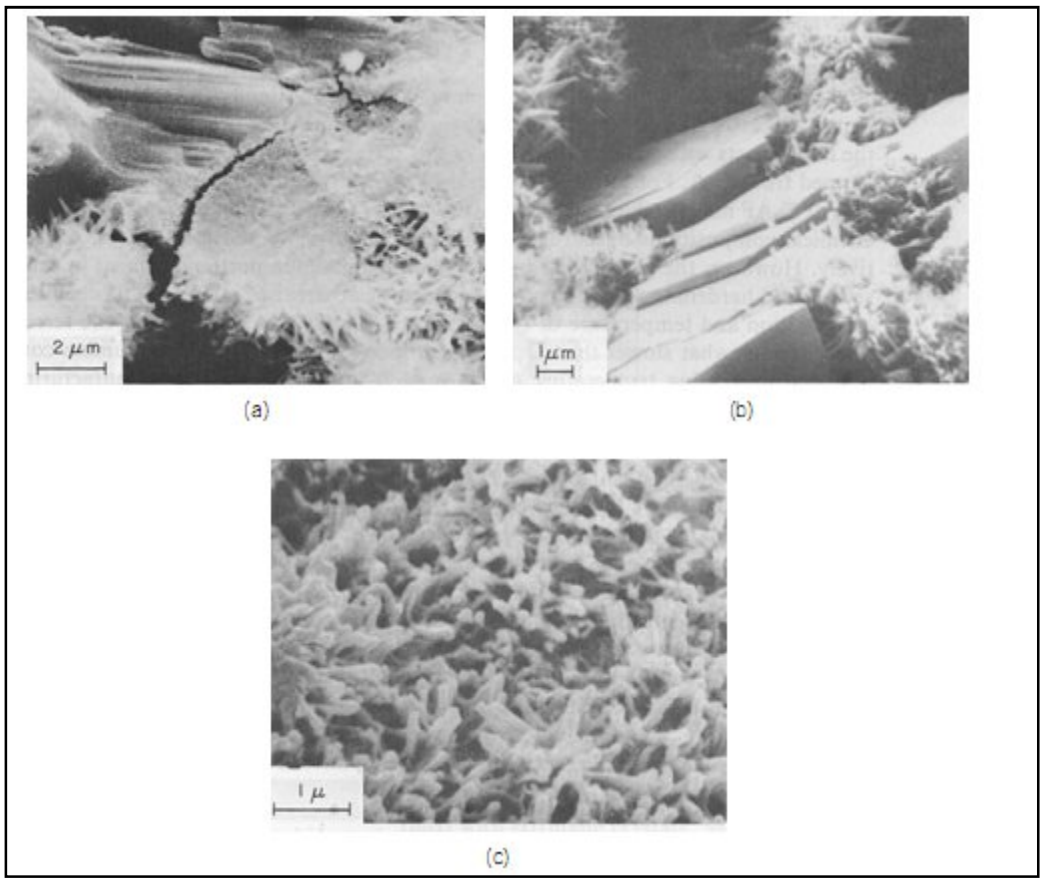
La période d'accélération est celle ou la réaction chimique est la plus forte. Les concentrations en ions Ca_2+ et OH− sont devenues très importantes et cela a comme effet de favoriser la précipitation de la portlandite ($CaOH_2$). Ce phénomène serait responsable de l'éclatement de la couche d'hydrates qui s'est formée durant la période de pré-induction. Une fois cette couche disparue, les réactions chimiques peuvent se poursuivre. Cette étape est

également caractérisée par la précipitation des C-S-H. Elle correspond au début de la prise du béton [Gardner.E.M, Gaidis.W.R 91]

La période de décélération débute après que la chaleur d'hydratation a atteint un maximum. Il y a de moins en moins de grains de ciment anhydre, ce qui provoque une diminution de la chaleur d'hydratation. Durant cette période, il y a, une fois de plus, formation d'une couche d'hydrates en surface des grains.

Etant donné qu'il y a beaucoup de C-S-H qui se sont formés, la diffusion de l'eau vers les grains de ciment anhydre est ralentie. L'intensité des réactions chimiques est donc limitée.

La dernière étape est celle de la consolidation. Elle correspond à l'hydratation des derniers grains de ciment anhydre. Cette période peut durer des dizaines d'années. La quantité de chaleur dégagée est à son plus bas.



Figue-6-*Microstructure d'une pate de ciment après 3 jours de durcissement [Kumar.P,Paulo.J.M 06]*

I-2-2 -Notion de seuil de percolation :

Au cours des premières heures de son histoire, le béton est soumis à de forts changements de microstructure. En effet, au moment du gâchage, le béton est un matériau assimilable à un fluide dans lequel les grains anhydres sont en suspension dans l'eau. Le passage de ce matériau fluide à un solide capable de reprendre et transmettre les efforts qu'on lui impose se fait par hydratation progressive des grains anhydres qui conduit à la formation d'un matériau cohérent. Pour caractériser les changements à l'origine de ce passage fluide/solide, on introduit la notion de seuil de percolation entre phases solides [ACKER 88]. Ce seuil de percolation entre phases solides correspond au degré d'hydratation critique qui correspond à la formation d'un premier chemin de percolation (Figure-7).

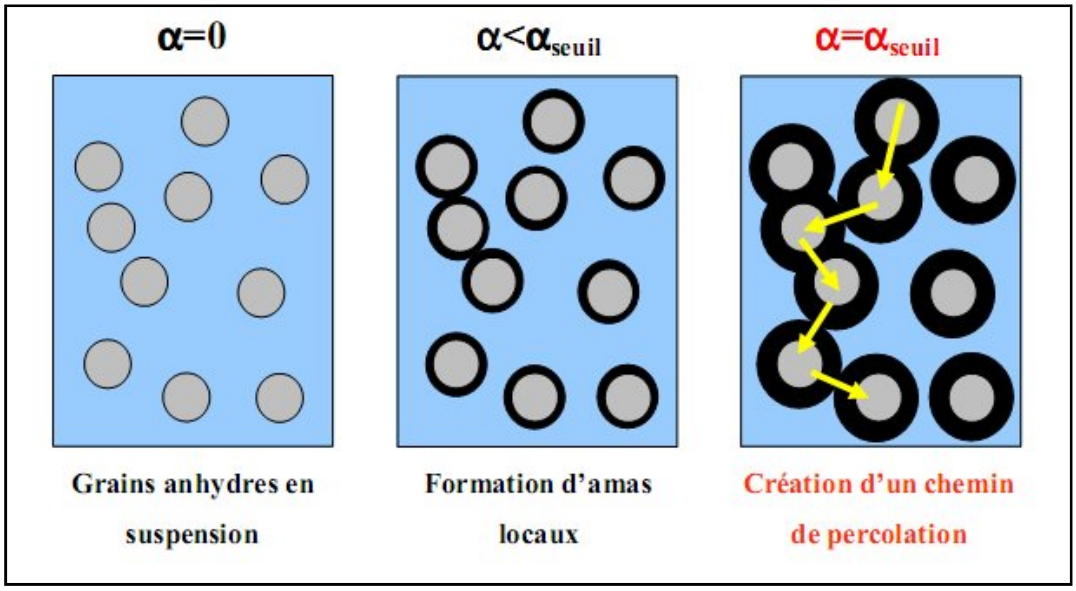


***Figure-7**- Illustration de la création d'un chemin de percolation entre phase solides [Acker88]*

Le seuil de percolation entre phases solides va être influencé par le rapport E/C (et par la défloculation des grains) puisque, pour un rapport E/C plus élevé, les grains anhydres vont être initialement plus dispersés et il faudra atteindre un degré d'hydratation plus important avant d'obtenir la création d'un chemin de percolation entre les phases solides.

Bernard et al. [Bernard ET AL. 03a] montrent que pour des rapports E/C inférieurs à 0,318, les grains anhydres seuls suffisent à l'apparition d'un chemin de percolation, le seuil de percolation étant alors $\alpha_s = 0$. Au-delà de ce rapport E/C critique, ils montrent que le seuil de percolation α_s augmente linéairement avec le rapport E/C.

Ce seuil de percolation sera également influencé par la teneur en granulats, puisque leur introduction dans la pâte de ciment conduit à une augmentation de la proportion de phases solides et donc à une diminution du seuil de percolation entre phases solides. Le seuil de percolation entre phases solides peut être détecté par l'utilisation de méthodes acoustiques non destructives ([Boumiz et AL. 96], [YE et AL. 04], [Kraub et AL. 06]). Il est alors caractérisé par une brusque variation de la vitesse de propagation des ondes acoustiques qui peuvent beaucoup plus facilement se propager grâce au chemin de percolation entre phases solides (Figure-8).

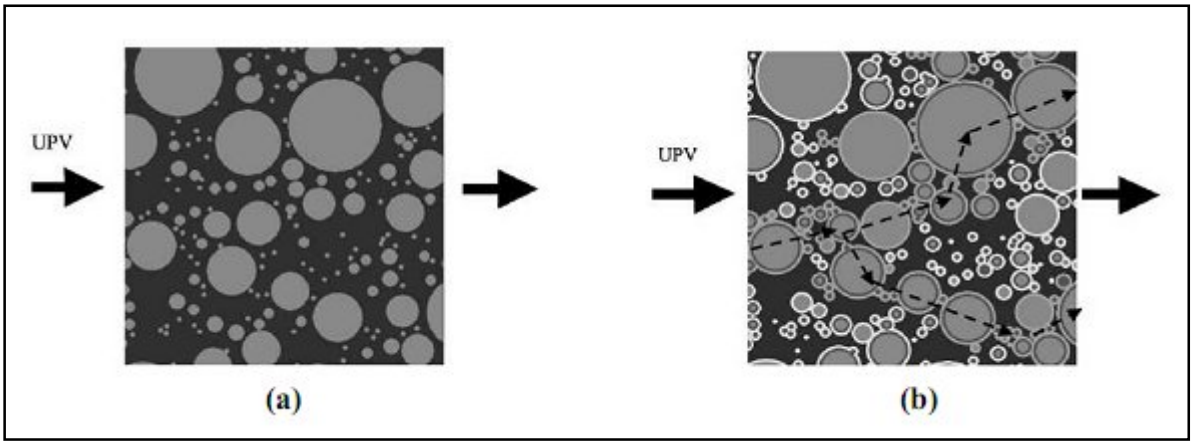


Figure-8- *Illustration de la propagation des ondes acoustiques dans e béton avant e seuil de percolation (a) et après la création d'un chemin de percolation (b) [YE et AL 04]*

Il peut également être détecté par la mesure de l'évolution des propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité ou la résistance en compression. Le seuil qui est alors caractérisé est le seuil de percolation mécanique. Torrenti et al. [Torrenti et AL. 05] montrent numériquement que ce seuil de percolation mécanique est légèrement différent du seuil de percolation entre phases solides puisqu'il fait également intervenir la notion de cohésion entre les phases solides percolées, cette cohésion étant nécessaire au passage du matériau fluide au matériau solide cohérent. Ceci est par ailleurs confirmé par les résultats présentés dans [Byfors 80] qui montrent que pour des E/C de 0,157 et 0,25 le seuil de percolation mécanique n'est pas nul alors que le calcul du seuil de percolation entre phases solides [Bernard et AL 03] montre qu'il est nul pour des E/C inférieurs à 0,318. C'est donc cette notion de seuil de percolation mécanique qui doit en réalité être prise en compte dans les modélisations de l'évolution des propriétés mécaniques puisque le seuil de percolation mécanique permet justement de définir l'instant où le matériau commence à être résistant.

I-2-3- Déformations au jeune âge :

I-2-3-1 Déformations endogènes :

Les déformations au jeune âge peuvent être liées à deux origines : origine physico-chimique dû à « la contraction Le Châtelier et l'autodessiccation liée au processus d'hydratation et l'évolution de la microstructure » et d'origine thermique dû à « l'effet thermique lié à l'exothermie de l'hydratation ».

I-2-3-1-1 Retrait chimique (contraction Le Châtelier) :

Durant l'hydratation, le retrait chimique se manifeste par un déficit volumétrique des hydrates produits. Dès que la prise commence, le squelette solide commence à se former, celui-ci devient de plus en plus rigide et s'oppose à la contraction Le Châtelier.

I-2-3-1-2 Retrait thermique :

Du fait de l'exothermie de la réaction d'hydratation, la température s'élève par rapport à la température initiale et durant le refroidissement, le béton subit un retrait thermique. Le dégagement de chaleur lors de l'hydratation du matériau cause des gradients thermiques entre la surface qui refroidit et le cœur qui reste à des températures élevées. En cas de déformations libres, ces gradients engendrent des fissures de peau, par contre lorsque les déformations sont empêchées des contraintes de traction accompagnent le refroidissement d'où le risque d'apparition de fissures traversantes si celles-ci dépassent la résistance à la traction du matériau. La majorité des contraintes développées au jeune âge sont liées aux effets thermiques [Bjontegaard et Sellevold, 01 ; Sule et Van Breugel 00].

I-2-3-1-3 Retrait d'autodessiccation :

Le retrait d'autodessiccation se produit au cours de l'hydratation en condition isotherme (sous température constante et sans aucun échange d'humidité avec le milieu ambiant). Avec l'avancement des réactions d'hydratation, le nombre de ménisques augmente et leurs rayons diminuent se qui résultent en une diminution de l'humidité relative (autodessiccation) et se traduit par une diminution du volume externe suite à une mise en traction de l'eau des pores et à une mise en compression du squelette solide.

I-2-3-2 Facteurs influençant le retrait endogène :

De nombreux paramètres peuvent influencer l'autodessiccation et donc le retrait endogène à savoir : le rapport E/C, la nature du ciment, la présence d'ajouts minéraux, les granulats, les adjuvants et la température.

I-2-3-2-1 Influence du rapport E/C :

De nombreux auteurs ont montré que le retrait endogène est faible pour les rapports E/C élevés comparativement aux mélanges avec des rapports E/C inférieurs à 0.30, du fait que l'autodessiccation est faible (Figure-9) [Hua et coll 95 ;Tazawa et Miyazawa 95 ; Persson 98].

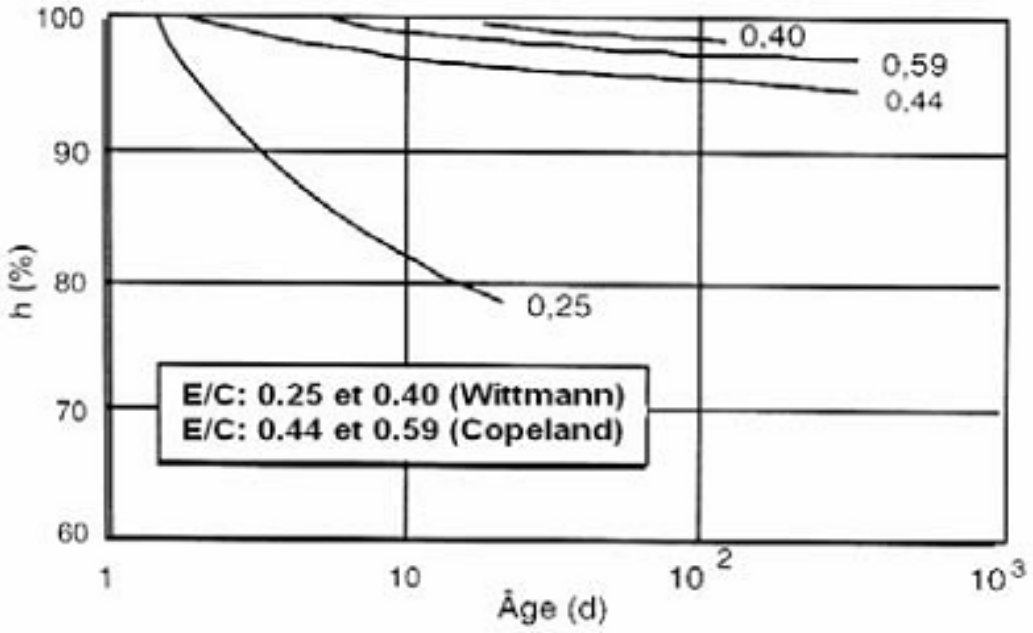


Figure-9- Influence du rapport E/C sur l'autodessiccation [Hua et Coll 95]

Le retrait endogène est élevé et commence plus tôt lorsque le rapport E/C est faible et quand la microstructure devient dense [Tazawa et Miyazawa, 95]. Les auteurs ont trouvé pour une pâte de ciment avec E/C =0.17, un retrait endogène de l'ordre de 2500x10-6 et 4000x10-6 à 1 et 14 jours respectivement.

I-2-3-2-2 Influence de la nature et de la finesse du ciment :

La composition minéralogique et la finesse du ciment influencent l'autodessiccation [Jensen 00 ; Loukili 96]. [Tazawa et Miyazawa 95, 97] ont proposé une équation pour évaluer le retrait endogène de la pâte de ciment en fonction de sa composition minéralogique et le degré d'hydratation de chaque phase. Dans laquelle le C_3A et le C_4AF constituent les phases minéralogiques influençant de façon dominante le retrait endogène [Neville 95]. Ils ont obtenu une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et ceux prédits pour des pâtes avec différents types de ciment et avec un rapport E/C = 0,3.

Par contre, [Jensen 00] a observé que l'accroissement de la teneur en C_3A dans le ciment conduit à une forte réduction du retrait endogène et de l'autodessiccation, qu'il attribue à l'expansion due à la formation d'ettringite qui va contrecarrer le retrait. Ces divergences montrent qu'il n'existe pas encore une explication claire de l'influence de la composition minéralogique du ciment sur le retrait endogène.

La finesse du ciment influe aussi sur le retrait endogène du moment qu'elle influence l'hydratation, plus la finesse est grande plus la surface totale en contact avec l'eau est grande, plus la cinétique d'hydratation et le retrait endogène sont élevés [Tazawa et Miyazawa 95 ; Jensen 00]. L'importance du retrait endogène est liée à la petite taille des pores capillaires qui engendrent des forces de tensions capillaires importantes.

I-2-3-2-3 Influence de l'adjuvant :

L'adjuvant peut influencer l'autodessiccation s'il contient des alcalis selon Baroghel [Broghel 94]. D'après [Tazawa et Miyazawa 95], l'influence du type et du dosage d'adjuvant sur le retrait endogène est minime, ils attribuent ceci à sa faible influence sur le taux d'hydratation.

I-2-3-2-4 Influence de la température :

L'influence de la température au jeune âge sur les déformations et les contraintes développées dans les bétons conventionnels et de hautes performances a fait l'objet de nombreuses études. Deux approches ont été considérées lors de ces études. La première consiste à évaluer l'influence de la température sur les phénomènes précités sous différentes températures isothermes. La seconde consiste à étudier cette influence sous des conditions de

températures réelles simulant l'évolution de la température dans le matériau durant son hydratation (échauffement puis refroidissement) [Bjontegaard, 99 ; Bjontegaard & Sellevold, 00 ; Loukili et coll., 00 ; Lura et coll, 01]. Les plus récentes études montrent que l'influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton en condition isotherme n'est pas monotone.

L'influence de la température sur le retrait endogène n'est pas entièrement claire (l'augmentation et la réduction des températures engendrent une augmentation du retrait endogène). D'autres investigations sont indispensables pour une certaine étendue de températures (10 - 40° C).

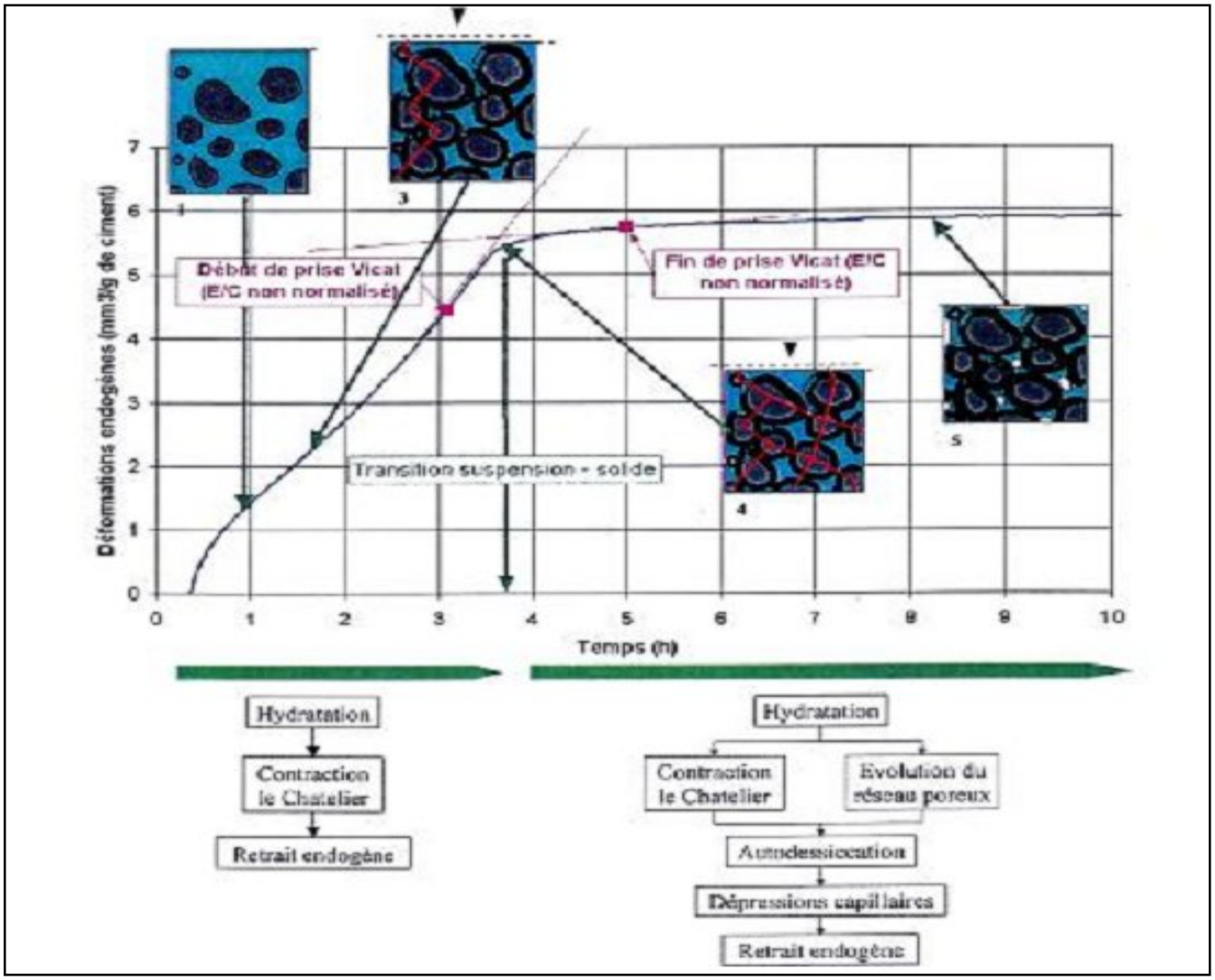


Figure-10- *Evolution du retrait endogène au cours du temps [Barcelo 01]*

I-2-4- Retrait de séchage :

Avant que la réaction chimique débute, le béton contient une quantité initiale d'eau. Selon le rapport E/C du béton, la majorité de cette eau est consommée par la réaction chimique lors de l'hydratation du béton. Si le béton n'est pas en conditions scellées, une partie de l'eau, qui n'est pas consommée dans les premiers temps de la réaction chimique, a tendance à s'évaporer (cela peut cependant varier selon les conditions externes auxquelles est exposé le béton). Ce phénomène est du à la tendance naturelle au rétablissement d'un équilibre entre l'humidité relative du béton et l'humidité relative de l'environnement ambiant. La perte d'humidité à l'intérieur du béton a comme conséquence de créer le retrait de séchage.

I-3-Microstructure de béton durci :

Le béton devrait être traité comme un matériau composite. Un matériau composite est une combinaison tridimensionnelle au moins de deux matériaux chimiquement et mécaniquement distincts avec une interface définie séparant les composants. Ce matériau multiphasé aura des propriétés différentes des composants originaux. Le béton qualifie comme un matériau multiphasé.

I-3-1-Structure des hydrates de ciment :

Le béton est considéré en tant qu'un matériau biphasé, à savoir, la phase pâte et la phase agrégat, l'arrangement de la phase de pâte et très important et très influençant sur le comportement du béton. La résistance, la perméabilité, la durabilité, le retrait de séchage, les propriétés élastiques, le fluage et les propriétés de changement de volume du béton sont considérablement influencées par la structure de pâte, la phase agrégat a peu d'influence sur les propriétés du béton que la phase pâte. [Shetty.M.S,05]

I-3-2- Porosité :

La porosité de la pâte de ciment joue un rôle non négligeable sur les propriétés du béton et notamment sur les propriétés de transfert. La taille des pores peut varier entre 1 nanomètre et 1 millimètre. Ils sont généralement classés par familles correspondant à leur taille :

- les pores des hydrates qui sont les plus petits. Ils varient entre le nanomètre et la dizaine de nanomètres. Ils correspondent aux espaces entre les feuillets de C-S-H ou entre les

particules du gel. Cette porosité est approximativement constante quel que soit le degré d'hydratation (28% de la porosité totale) ;

- les pores capillaires dont la taille varie de 10 à 500 nanomètres. Il s'agit des espaces non comblés entre les grains de ciment par les hydrates. Cette porosité va évoluer avec l'avancement des réactions d'hydratation et le rapport E/C ;

- la dernière classe de pore, dont la taille peut aller jusqu'à une échelle millimétrique correspond à la porosité due aux bulles d'air entraînées, aux microfissures et fissures apparaissant lors de l'exploitation du matériau voire aux défauts de mise en œuvre.

La présence de granulats modifie l'arrangement des grains de ciment par effet de paroi et la distribution de l'eau dans le mélange [Ollivier 81]. Ceci entraine des modifications locales du rapport E/C. Cette zone autour des granulats est appelée « auréole de transition ». Cette répartition des rapports E/C autour des granulats engendre des valeurs de porosité plus élevées dans l'auréole de transition plus faibles dans la pâte. C'est la porosité interconnectée qui va influer sur les valeurs des propriétés de transfert. Plus cette porosité sera importante, plus la diffusion sera grande [Tognazzi 98].

I-3-3-Zone de transition :

La résistance du béton dépend de la résistance de la pâte, de granulats, et de l'interface de pâte-granulat. Cette interface est la région la plus faible du béton là où la rupture se produit avant son occurrence sur le granulat ou la pâte. La faiblesse de cette interface est due à la faible adhérence et au développement des fissures qui peuvent se développer en raison de ressuage et de ségrégation et de changement de volume de la pâte de ciment pendant la prise et l'hydratation. La zone de transition a une porosité et une perméabilité plus élevées. Cet espace est occupé par les cristaux orientés et bien développés de l'hydroxyde de calcium et, dans certains cas le C-S-H et l'ettringite.

Les effets de la zone de transition sont particulièrement significatifs avec les pâtes ou le béton fait avec un rapport E/C plus grands que 0.4. La présence de fumée de silice, cependant, peut modifier ou même éliminer la zone de transition. Ceci est généralement attribué aux changements de la viscosité ou de la cohésion donnée par la fumée de silice au béton. La zone de transition altérée, l'adhérence améliorée de la matrice granulats, et le

remplissage optimal de particules en présence de la fumée de silice, ont comme conséquence l'augmentation de la résistance. [Ramachandran.V.S et Beaudoin.J.J 01]

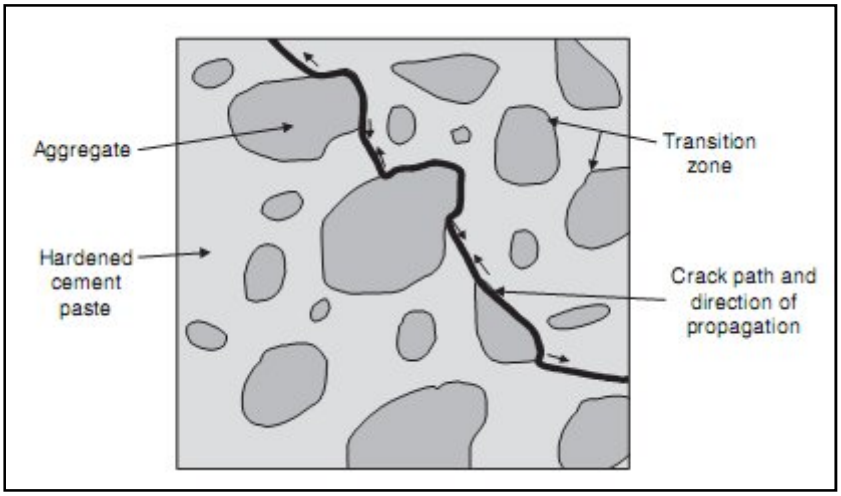


Figure-11- *Cracking pattern in normal-strength concrete[Shetty.M.S 05]*

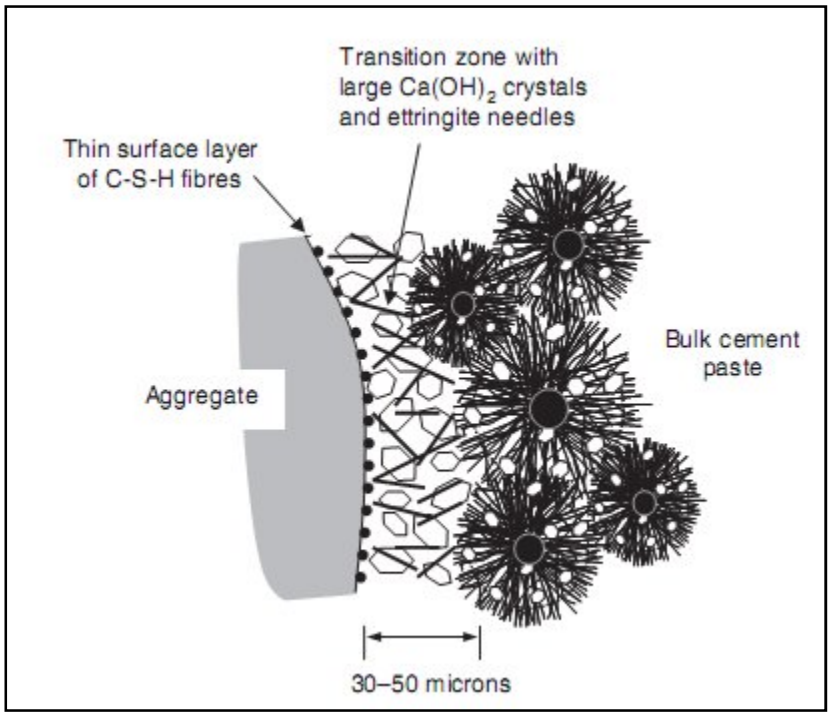


Figure-12*- features of the transition zone at the paste-aggregate interface (adepted from De Rooij et al ,98) [Shetty.M.S 05]*

Bien qu'il y a quelques différence d'avis, il y a un consensus général que la zone est entre 30 et 50 microns de large et que sa structure - sous une forme beaucoup simplifiée - est suivant les indications de figure 12 Ceci montre deux caractéristiques principales (réptition de la largeur de la zone de transition)

• une couche extérieure très mince de fibres de silicate de calcium hydratée sur le granulat, contenant également quelques petits cristaux d'hydroxyde de calcium (portlandite)
• une plus grande concentration des cristaux d'hydroxyde de calcium et des aiguilles fines de sulphoaluminate de calcium (ettringite) que dans la pâte en bloc et par conséquent une plus grande porosité.

En raison de la variation retrait de séchage ou de température, la zone de transition développe des microfissures même avant que la structure est chargée. Quand la structure est chargée et aux niveaux élevés de contraintes, ces microfissures propagent et de plus grandes fissures sont formées. Par conséquent, la zone de transition, généralement le lien le plus faible de la chaîne est considérée la phase de la résistance limite en béton. [P.Domone et J.Luston 10]

I-3-4-Développement mécanique du matériau :

La résistance mécanique du matériau se développe durant l'hydratation : on parle alors de prise du béton. La formation progressive des hydrates permet l'obtention d'une matrice cimentaire résistante mécaniquement.

Le développement des propriétés mécaniques d'un béton est fonction de sa formulation et en particulier de la nature du ciment. Certains ciments comme les CEM I font l'essentiel de leur hydratation très tôt et développent donc l'essentiel de leurs propriétés mécaniques entre un et quelques mois. En revanche, pour des ciments à hydratation plus lente (comme les ciments mélangés, contenant de fortes proportions laitiers de hauts fourneaux ou de cendres volantes), ce processus peut se dérouler sur plusieurs années.

Un autre paramètre influant sur la résistance mécanique est le rapport E/C. L'augmentation du dosage en eau augmente la porosité capillaire et donc abaisse la compacité. Une conséquence macroscopique de ce processus est une chute des résistances mécaniques. [Neville 00 ; Felekoglu 07]

L'augmentation du rapport E/C fait donc diminuer la résistance du matériau et ceci quelque soit son âge. Ceci est à relier à la quantité d'eau libre présente au sein du matériau, qui conditionne la porosité et par conséquent la résistance du béton.

Chapitre II

Etude Bibliographique

Sur Les Pouzzolanes

II-1-La pouzzolane :

II-1-1-Historiques des pouzzolanes :

II-1-1-1-Dans le monde :

Le béton existe dans la nature sous forme de poudingues calcaires et siliceux, mais c'est aussi un matériau très ancien puisque la maçonnerie romaine était faite de cailloux noyés dans un mortier à base de pouzzolanes volcaniques avec la chaux et de l'eau, d'une extraordinaire tenue dans le temps.

En effet pour leurs différentes constructions les Romains utilisaient la pouzzolane (tuf zéolite qu'ils trouvaient dans la baie de Naples, au pied du mont Vésuve, à Pouzzoles, d'où le nom de pouzzolane sous lequel est connu ce matériau), qui mélangée à de la chaux grasse donnait un mortier très résistant et durable : c'était là le secret de leur « ciment ».

La célébrité « des ciments » romains était finalement due à l'exploitation consciente de l'effet pouzzolanique, mais ils n'ont pas été les seuls à les découvrir. En effet, dans l'ile de Bali, à l'est de Java (Indonésie), les habitants utilisent depuis plus de deux mille ans , pour construire les murets de leurs rizières en terrasse, un mélange de chaux, corallienne, cuite au feu de noix de coco, et de cendres de leur volcan sacré, l'Agung, qu'ils retrouvent dans les partie fines de sables de leurs rivières . Certains de ces murets, toujours en service, sont biens antérieurs à Jésus-Christ.

Les murs du panthéon, célèbre temple de Rome (construit en 27 av. J.C.), ont été jointoyés par un mortier constitué d'un mélange de chaux et de pouzzolane ; de même, pour la construction de son dôme, les romains ont utilisé un mortier à base de pouzzolane.

On sait que les grecs mélangeaient la chaux grasse avec des cendres volcaniques de l'île de Santorin, ils obtenaient ainsi de véritables liants hydrauliques. On a retrouvé dans ces pays d'anciens mortiers ou bétons de chaux à la pouzzolane. Entre l'an 700 et l'an 600 Av. J. C., dans la ville grecque antique de Camiros située dans l'ile de Rhodes, un béton contenant de la pouzzolane naturelle et de la chaux avait été utilisé pour garnir les parois d'un réservoir à l'eau.

Au moyen âge, on ajoutait à la chaux des cendres pour construire les habitations. On ajoutait également à la chaux des tuiles et de la brique pilée, des déchets de poterie, des mâchefers de foyers domestiques.

Le pont du Gard en France est un exemple d'utilisation ancienne d'un mélange de chaux et de pouzzolane (pour jointoyer les pierres).

Les ciments pouzzolano- métallurgiques ont été fabriqués pour la première fois en France, en 1951. Ces ciments résultent du broyage de clinker, de gypse, de laitier et de cendres volantes. En Italie, la fabrication industrielle d'un ciment pouzzolanique a commencé dés 1923. [Dron.R 75]

II-1-1-2-En Algérie :

Dés la fin de l'époque tertiaire, la côte oranaise fut le siège d'une activité volcanisme et passe d'une nature acide à un volcanisme basique où les formations basaltiques prédominent.

L'activité volcanique du tell oranais est manifestée presque entièrement dans sa partie côtière durant la période comprise entre la fin du miocène et le quaternaire. Cette activité est liée à la seconde phase de l'activité tectonique, phase de la tectonique cassante.

Les premières études sur le volcanisme de la Basse-Tafna remontent à 1874 lorsque Velain donne une très courte description pétrographique du matériel éruptif et signale entre autre une néphéline dans l'île de Rachgoun qui a également été décrite par Lacroix (1983).

Grâce à cette activité volcanique, l'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique sur une longueur de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran.

Dés 1985, et après une étude sur les matériaux pouzzolaniques du gisement de Bou-Hamidi (situé à 2 Km 500 au sud de Béni-Saf), l'unité FER-PHOS entreprit l'exploitation de cette pouzzolane et grâce à la ligne ferroviaire Béni-Saf - Ain Temouchent, elle est expédiée vers Zahana, Saïda, Chlef et d'autres régions du territoire Algérien. [Sardon.G 58].

II-1-2-Pouzzolane naturelle :

II-1-2-1- Matériaux d'origine volcanique (Les roches Pyroclastiques) :

Les roches pyroclastiques résultent des éruptions volcaniques explosives qui projettent les particules minutieuses du magma fondu dans l'atmosphère. La diminution rapide de pression se produisant pendant l'éruption conduit à libérer le gaz dissous dans le magma liquide. Par conséquent, chaque particule contiendra un certain nombre de bulles et de

conduits microscopiques formant une structure microporeuse. Simultanément, les particules sont sujettes à une trempe qui est responsable de leur état vitreux. Le matériau peut être déposé au sol ou dans l'eau. Généralement, les dépôts au sol, qui sont lâches et hétérogènes, se composent de cendres mélangées aux fragments venant des murs des conduits volcaniques ou de la base du volcan. [Peter C. Hewlett 04]

Tableau-5-*Analyse chimique de quelques pouzzolanes volcaniques [Peter C. Hewlett 04]*

Pouzzolane	pays	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3	P.F
Bacoli	Italie	53.08	17.89	4,29	9.05	1.23	3.08	7.61	0.31	0.65	3.05
Barile	Italie	44.07	19,18	9.81	12.25	6.66	1.64	1.12	0.97	Tr*	4.42
Salone	Italie	46.84	18.44	10.25	8.52	4.75	1.02	6.35	0.06	Tr	3.82
Vizzini	Italie	50.48	16.77	11.59	4.86	5.24	0.87	0.17	0.08	0.15	9.68
Volvic	Farnce	54.30	16.80	/	/	/	4.47	2.6	/	/	/
Santorin carth	Grèce	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	/	/	/	/	3.5
Rhine tuffash	Allemagne	58,91	19.53	2.85	2.48	1.33	6.12	4.53	/	/	2.21
Rhyolite pumicite	USA	65.74	15.89	2.54	3.35	1.33	4.97	1.92	/	/	3.43
Furue shirasu	Japon	69.34	14.56	1.02	2.61	/	3.00	2.39	0.25	/	1.85
Higashi Matsuyama	Japon	71.77	11.46	1.14	1.10	0.54	1.53	2.55	0.14	/	6.50

II-1-2-2- Matériaux d'origine sédimentaire :

Les argiles et les terres de diatomées sont des roches sédimentaires capables de se combiner avec la chaux. Les premières proviennent du changement de roches magmatiques tandis que les dernières se forment à partir des squelettes siliceux des micro-organismes (diatomées) déposés en eaux douces ou de mer. Puisque les deux matériaux (matières) résultent de la déposition dans l'eau malgré leur origine différente, il n'est pas étonnant que les diatomées et les minerais d'argile se produisent mélangés ensembles. Les minerais d'argile, particulièrement ceux qui appartiennent au groupe de montmorillonite, peuvent réagir avec la chaux donnant des hydrates de silicate et d'aluminate de calcium mais ils ne peuvent pas remplacer la pouzzolane à mesure qu'ils augmentent la demande en eau et abaissent la résistance du mortier et du béton.

Le plus grand dépôt de diatomites se trouve en Californie, aux USA. D'autres dépôts importants se trouvent en ancienne URSS, au Canada, en l'Algérie, en l'Allemagne et dans d'autres pays. [Peter C. Hewlett 04]

II-1-2-3-Matériaux d'origine mixte (roche hybride:)

Au nord de Rome il y a les dépôts stratifiés d'une roche friable (Sacrofanite) composée de matériaux d'origine différente (volcanique, sédimentaire et organique). Les couches supérieures contiennent une teneur en silice jusqu'à 90 %, perte considérable au le feu et un peu d'autres oxydes. En ce qui concerne les couches plus profondes, la teneur en silice est sensiblement moindre, l'alumine peut atteindre environ 20%, mais d'autres oxydes sont présents seulement en petites quantités. La faible teneur en fer explique la couleur légère de ces matériaux, généralement connue sous le nom de « terre blanche ». [Peter C. Hewlett 04]

Tableau-6-*Analyse chimique de quelques pouzzolanes riche en Silice [Peter C. Hewlett 04]*

Pouzzolane	pays	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	P.F
Les terres de diatomé											
Moler	Danemark	75.6	8.62	6.72	/	1.1	1.34	0.43	1.42	1.38	2.15
Diatomite	USA	85.97	2.30	1.84	/	trace	0.61	0.21	0.21	/	8.29
Diatomite	USA	60.04	16.30	5.80	/	1.92	2.29	/	/	/	11.93
Origines mixtes											
Sacrofanite	Italie	85.50	3.02	0.44	1.22	0.58	/	0.16	0.26	0.77	7.94
Terre blache(a)	Italie	90.00	2.70	0.70	/	0.20	/	/	/	/	6.10
Terre blanche(b)	Italie	84.25	4.50	1.55	/	2.40	/	/	/	/	8.40
Terre blache(c)	Italie	78.40	12.20	1.50	/	1.55	/	/	/	/	8.60
Terre blache(d)	Italie	56.80	21.40	1.70	/	2.35	/	/	/	/	7.50
Beppu avec argile	Japon	87.75	2.44	0.41	1.10	0.19	0.23	0.11	0.11	/	/
Gaise	France	79.55	7.10	3.20		2.40	1.04	/	/	0.86	5.90

II-1-3-Pouzzolane artificielle :

II-1-3-1-Cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que Celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

• Les cendres silico- alumineuses (cendre de houille) ;

• Les cendres sulfocalciques (cendre de lignite) et

• Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

II-1-3-2-Argiles, Schistes, Terres de diatomées torréfiées :

Le chauffage des argiles, à des températures correspondant à celles de la démolition thermique des minéraux qui les caractérisent provoque la rupture du réseau et par conséquent la formation d'un mélange de silice et d'alumine amorphe, dans les proportions stœchiométriques des minéraux d'origine. Puisque l'accroissement du désordre structural entraine l'augmentation de l'instabilité du système, on remarque une réactivité de la chaux et une perte de plasticité des Pâtes de ciment aux proportions convenables et peuvent révéler des résistances mécaniques de même ordre que celles qu'on peut obtenir par l'utilisation de pouzzolanes ou de cendres volantes.

II-1-4-Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

– Sa composition chimique vérifiée : $AL_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$ (ASTM C 618)

– Son indice d'activité **I** est : $0,67 < \mathbf{I} < 1$.

– Sa teneur en verre > 34%

- ✓ **L'indice d'activité :**

C'est une caractéristique importante. Elle est calculée en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier sans vase (T) et celle du mortier contenant 25% de vase (25 PA) en substitution par le biais de la formule suivante :

I = Rc28 T / Rc28 25PA

- ✓ **La teneur en verre :**

La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Pour cela, il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (Silice-Chaux). Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34%, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques cette différence doit être au moins supérieure ou égale à 34% pour que les pouzzolanes soient acides et contiennent une phase vitreuse, donc capables de fixer la chaux libérée par le ciment. [Benkaddour. M, Kazi Aoual. F et Semcha. A 09]

D'autre part, la reconnaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure. [Venuat.M 89]

On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts des produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- ✓ **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 pouzzolaniques, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

II-1-5- Activité pouzzolanique :

L'activité pouzzolaniques ou pouzzolanicité est l'aptitude de certains matériaux dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment Portland. Cette propriété se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice libre non quartzeuse, quelle que soit leur origine : matériaux naturels (gaize, diatomites, cendres volantes) matériaux artificiels (cendres volantes, fumées de silice, argiles calcinées, cendres de balles de riz).

L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts: [Christel.B 05, Schnindler.A et Folliard.K 03]

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

II-1-5-1-Estimation de l'activité pouzzolanique :

L'estimation de l'activité pouzzolaniques de l'ajout est déterminée par plusieurs méthodes connues. Citons quelques unes :

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité Chapelle).
- Méthodes physiques.
- Essais mécaniques et analyses chimiques.
- Evaluation la pouzzolanicité d'un mélange argile calcinée/$Ca(OH)_2$ =1.

II-1-5-2-Nature des hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique :

II-1-5-2-1-Hydratation des ciments aux pouzzolanes :

Un ciment composé à la pouzzolane doit satisfaire les spécifications de l'activité pouzzolanique. Notamment la résistance à la compression du ciment composé qui doit présenter un indice d'activité pouzzolanique au moins égal à 75% de la résistance du ciment Portland de référence à 28 jours selon la norme ASTM C618.

La réaction des constituants du ciment à base de pouzzolane se fait par l'intermédiaire d'un processus de dissolution des produits anhydres dans l'eau interstitielle suivi d'une cristallisation (ou une précipitation) des hydrates, par combinaison des ions présents dans la solution ainsi formée (théories de le Chatelier). [Young J.F 80, Ambroise J et Murat M, Pera J 85]

Les hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique sont en général des minéraux mal cristallisés. La nature chimique de ces minéraux dépend :

- Des conditions d'hydratation des pâtes mixtes (température, teneur en eau, ...)
- De la nature cristallographique et composition chimique des matériaux pouzzolanique
- De la concentration des ions présents dans la solution.

L'hydroxyde de calcium Ca $(OH)_2$ libéré en grande quantité pendant l'hydratation du ciment Portland ne se combine pas toujours sous forme d'hydrate et reste disponible pour d'autres réactions avec d'autres composants du ciment, il présente la principale source d'alcalinité pour l'activité hydraulique nécessaire à la conversion de SiO_2 de la pouzzolane en C-S-H .

Les hydrates formés lors de la réaction d'hydratation d'un ciment portland sont pratiquement des C-S-H amorphes et non stœchiométriques contenant une quantité d'atomes d'aluminium moins importante que Les C-S-H formés lors de la réaction pouzzolanique. [Blombled.J.P 85]

La vitesse d'hydratation des composés minéraux est d'autant plus grande que la température de conservation des pâtes mixte est élevée. Blombled. J.P (1985) a étudié l'impact de la température sur la formation des produits hydratés lors de la réaction pouzzolanique entre l'argile calcinée et l'hydroxyde de calcium.

Les principaux produits d'hydratation à 20°C sont : C_2ASH_8, C-S-H, C_4AH_{13} et C_3AH_6, C-S-H et C_4AH_{13} à 55°C. Dron R. (1978) admet que la nature des phases hydratées formées dépend de la quantité d'hydroxyde de calcium. Lorsque le pourcentage d'hydroxyde de calcium est supérieur ou égal à 60%, les produits d'hydratation des pouzzolanes sont CH, C-S-H et C_4AH_{13}, sinon, pour des pourcentages d'hydroxyde de calcium moindres, les hydrates formés sont C-S-H, C_4AH_{13}, C_2ASH_8.

De plus d'après Barron J. et Sauterey R (1982) le C_2ASH_8 (géhlénite hydratée) se décompose en présence d'une solution saturée en hydroxyde de calcium en C-S-H et C_4AH_{13} stable selon l'équation suivante.

$$C\ ASH\ + 3CH + 3H \rightarrow CSH + C\ AH$$

Aussi selon plusieurs travaux de recherches effectués par Barron J. et Sauterey R (1982), ils affirment que la cinétique de l'hydratation des ciments aux pouzzolanes se fait en deux phases.

- La première phase est très rapide, est due à la réaction des alcalins (CaO, K_2O et Na_2O) produits par l'hydratation du ciment Portland.

- La deuxième phase est lente est due aux réactions d'hydroxyde de calcium lors de l'hydratation des pouzzolanes.

II-1-6- Comportement de La pouzzolane :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

II-1-6-1-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.

II-1-6-2-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.

En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre.
Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

II-2-La vase :

II-2-1-Définition et origine des sédiments :

Appelés communément vases, les sédiments marins et fluviaux sont constitués de phases minérale, organique et liquide. Dans le dictionnaire de géologie, les sédiments sont définis comme "un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport". Ces particules proviennent de l'érosion des roches et des sols, de l'activité organique (accumulation de coquilles, …) ainsi que des rejets locaux dus à l'activité humaine [Foucault et Raoult, 80].

II-2-2 Problème d'envasement :

L'envasement des retenues est un état critique qui produit la diminution de la capacité de stockage des barrages. Il est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants. Ce problème est très actif dans les pays à climat aride ou semi-aride.

L'Algérie se caractérise par un climat semi aride, qui perd annuellement un volume de stockage de l'eau de l'ordre de 32 millions de m^3 sur un volume de 5,2 milliards de m^3 des 114 barrages en exploitation [Remini et Hallouche 2005]. Un des barrages envasés en Algérie qui fait l'objet de notre étude est le barrage de Fergoug qui est situé au nord-ouest de l'Algérie. Les terrains vulnérables de formations géologiques marneuses de cette région sont soumis à une érosion accélérée. L'envasement des retenues est lié directement aux phénomènes de *l'érosion*. Les processus de la dégradation des terres ont pris des dimensions inquiétantes pour la gestion durable de l'environnement, plus de 16 % des terres cultivables ont été dégradées par l'érosion hydrique (55%) et éolienne (28%), [Roose 2004].

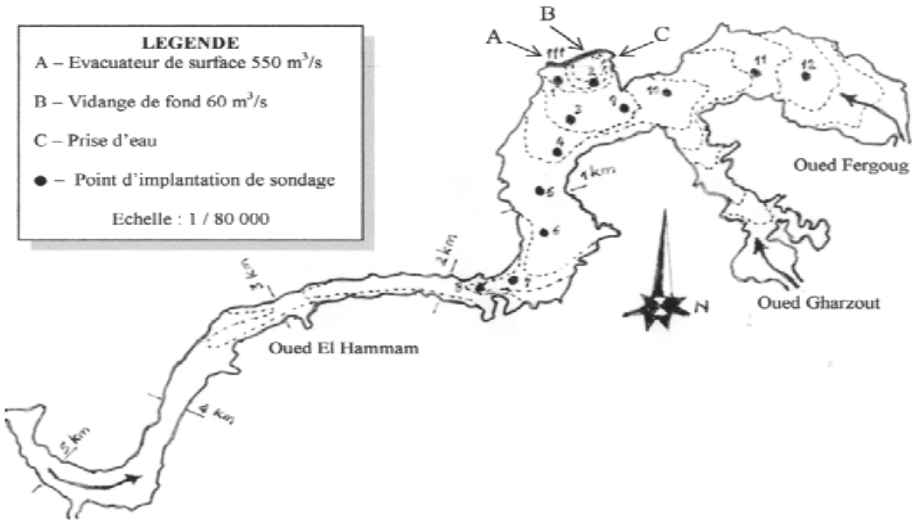


Figure-13- *Barrage de Fergoug [Semcha.A 06]*

II-2-3 Gestion des boues de dragage :

Une bonne gestion des déchets de dragage nécessite à trouver la meilleure solution à moindre coût en tenant compte des critères techniques, industriels et économiques. Dans ce cas, il faut créer de nouveaux procédés et techniques moins polluants pour remplacer les déchets. On peut imaginer la valorisation soit par réemploi ou par réutilisation du déchet, soit par traitement visant à obtenir de nouveaux matériaux. Ces trois aspects sont conditionnés par la valorisation des déchets en génie civil et doivent tenir compte des aspects suivants :

-Le tonnage : pour qu'un déchet soit valorisable, il faut que sa production soit importante et homogène ;

-La rhéologie : les déchets possèdent des caractéristiques mécaniques et physiques spécifiques ;

-L'environnement : le déchet est acceptable pour l'environnement, s'il n'engendre pas de risques de pollution, que ce soit par l'exposition ou par lessivage.

Si aucune solution de valorisation n'est envisageable, on peut citer d'autres voies :

-Le rejet des déchets dans le milieu naturel sans risque majeur de pollution pour l'environnement ;

-Le stockage qui consiste à la mise en décharge ou à l'enfouissement technique des déchets. Dans ce cas, les conditions de stockage doivent assurer la protection complète et durable des milieux physiques et vivants.

Ces déchets imposent un cadre législatif jusqu'alors inexistant. Les différents règlements préconisent que seuls les déchets ultimes seront stockés en décharge. Les lois définissent les grands axes sur la diminution des décharges, sur la prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets en agissant sur leur fabrication.

II-2-4 Débouchés potentiels en valorisation :

Les débouchés potentiels en valorisation sont généralement classés parmi trois domaines, [LIFE, 02] :

- le génie civil et les travaux publics,
- l'agriculture par l'amendement des sols,
- la réhabilitation de sites naturels (habitats aquatiques et terrestres de la faune).

II-2-5- Valorisation dans le génie civil :

Il existe de nombreuses voies de valorisation imaginables. Matériau de remplissage, de remblaiement, couche d'assise de chaussées, béton, brique. Il apparaît rapidement que la voie de valorisation béton est celle qui offre le plus de variantes possibles. Ne sachant pas quelles « performances » attendre du matériau valorisé, il était important d'avoir une grande liberté d'action. Le béton offre cette liberté : choix des quantités à substituer, du type de matériau à substituer (le liant, le sable ou les granulats), de la granulométrie, du type et de la quantité de liant à utiliser, des conditions de cures, des conditions d'utilisation. En fonction des résultats des études de valorisation nous disposions d'une large palette de paramètres sur lesquels il faut jouer pour parvenir à l'obtention d'un matériau valorisable.

II-2-6-Valorisation de la vase dans les ciments pouzzolaniques :

La valorisation de la vase dans le domaine des matériaux de construction se présente comme la solution écologique la plus adéquate pour l'exploitation des volumes très important de la vase accumulée dans la retenue surtout dans le domaine des bétons pouzzolaniques et dans la construction des barrages vus les volumes important que consomme la construction d'un barrage ce qui va influer sur le prix de revient de l'ouvrage et par la suite sur le prix du mètre cube d'eau mobilisée.

D'autre part cette solution (valoriser la vase) aura les conséquences suivantes :

1- Réduction des coûts de l'opération de d'évasement.

2- Augmenter le volume du réservoir pour répondre aux besoins de l'irrigation.

3- Répondre aux besoins croissant de matériaux de construction.

Un ciment pouzzolanique est un ciment constitué par l'addition d'une certaine quantité de clinker, à la pouzzolane. On sait que la pouzzolane est un produit qui n'est pas hydraulique par lui-même, mais qui est apte à fixer de la chaux aux températures ambiantes et à devenir de ce fait hydraulique ; d'où la constitution de ciments composés, ne comportant d'ailleurs que des matières actives, et qu'il ne faut pas confondre avec des ciments. [Dejddou.M et Remini.B 98]

II-2-6-1-La Calcination:

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence.

Pendant le chauffage, l'eau est perdue et un mélange de silice et d'alumine amorphes sera formé.

Pour valoriser les argiles, comme substituant partiel du clinker, le traitement thermique appliqué doit assurer la déshydroxylation tout en :

- Eliminant toutes les matières organiques incompatibles avec le ciment.
- Evitant la décarbonatation de la calcite néfaste pour la maniabilité des mortiers et bétons.

La calcination entre 550 et 800 °C des argiles permet le départ de l'eau de constitution (la déshydroxylation). La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux. Ce qui explique la forte diminution de la concentration en CaO de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines.[Chinje melo.U, Billong.N 04]

II-2-6-1-1-La calcination flash :

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules.

Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des

transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées. Les changements sont cinétiquement bloqués et les produits incomplètement déshydroxylés si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles des matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint. [Bich .C 05]

II-2-6-1-2 La calcination lente :

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°c et 1100°c) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures), comme le montre la figure14. [Bich .C 05]

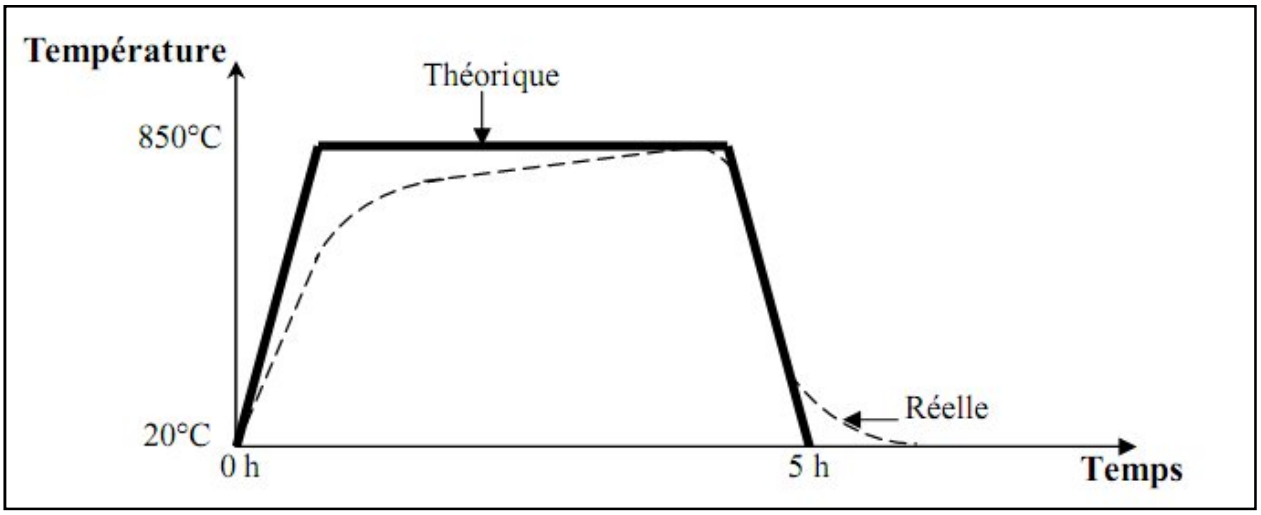


Figure-14- *Température du four en fonction du temps [BICH .C 05]*

II-3-Citation de quelques recherches :

Laoufi. L 02 a étudié les caractéristiques physico-mécaniques des bétons à base de ciment pouzzolanique, il a montré dans son étude que :

Dans les premiers jours de l'hydratation, les performances mécaniques se développent plus rapidement pour le béton témoin que pour les bétons pouzzolaniques. Le béton témoin atteint à 7 jours plus de 79 % de sa résistance à 28 jours, alors que les bétons pouzzolaniques ne dépassent pas 73 % de leur résistance à 28 jours à la même date (73 % pour B.Z.25, 67,80 % pour B.Z.20 et même 64,70 % pour B.Z.30).

Au-delà de 7 jours, les bétons pouzzolaniques poursuivent leur évolution au profit de celle du béton témoin et dépassent même : tous les bétons pouzzolaniques améliorent leur résistance mécanique à 60 jours au profit de celle de béton témoin.

A 90 jours, tous les bétons pouzzolaniques évoluent nettement plus vite que celle du béton témoin.

Aux jeunes âges l'influence de la pouzzolane (à taux 20, 25 et 30 %) a donnée des valeurs de résistances à la traction relativement faible vis-à-vis du béton témoin.

Au-delà de ces âges, les taux de 20 et 25 % de pouzzolane ont le plus influence sur les résistances à la traction, puisque leur évolution est plus prononcée, les résistances finales à ces taux, à 90 jours, ne sont inférieurs que de 4,92 % et de 9,76% respectivement de la résistance de béton témoin au même âge.

Le taux de 30 % de pouzzolane donne des résultats de résistance en traction les plus faibles, la résistance maximale à 90 jours, pour ce taux n'est que d'environ 74% de la résistance de béton témoin à la même échéance.

Kaid. N 00 a étudié l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et d'un adjuvant superplastifiant sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et sur l'évolution du retrait libre total des mortier desséchant conservés à une température de 15 °C ±1°C, contenant 2 % de superplastifiant avec un pourcentage de 5%, 10% et 15%. Elle a montré que :

-l'ajout pouzzolanique a engendré, par rapport au mortier témoin ,une diminution de la résistance en compression et en traction aux jeunes âges, les mortier contenant 5% et 10 % de pouzzolane et 2 % de superplastifiant développent des résistances significatives au delà de 14 jours, de grandes résistances ont constatées entre 28 et 270 jours pour les mortier contenant 10% et 15 % de pouzzolane et 2 % de superplastifiant.

Au-delà de 14 jours, la vitesse d'évolution du retrait total diminue et c'est le retrait du mortier témoin qui dépasse celui du mortier pouzzolanique, il atteint 25% de différence à l'âge de 3 moi.

Berraih. M 10 : a montré dans son étude que :

Les résistances à la compression diminuent en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane.

A 3 et 7 jours, le mortier avec 5% de pouzzolane développe une résistance meilleure que le mortier témoin (100,36 % et 103,48%) respectivement, tandis que pour les dosages en pouzzolane allant de 10 à 20 % la diminution passe de 17% à 20% à l'âge de 3 jours et de 13% à 28 % à l'âge de 7 jours par rapport à celle du témoin.

La perte de résistance varie de 6% et à 22% à 28 jours, de 10 % à 17% à 56 jours, de 3 % à 14% à 90 jours et de 5% à 13 % à 120 jours pour les mortiers avec 5% et 20 % respectivement.

Les résistances à la flexion diminuent légèrement en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane.

Un pourcentage de substitution faible de 5% de pouzzolane ne diminue pas sensiblement les résistances à court terme et à long terme (93,8% à 3 jours, 101,5 % à 28 jours, 99.36% à 120 jours).

Le mortier avec 10% de pouzzolane présente une perte de résistance en moyenne de 10 % à court terme, et de 5% à long terme.

Le mortier avec 20 % de pouzzolane présente une perte de résistance en moyenne de 21% à court terme, et de 8 % à long terme par rapport au mortier témoin.

Dés 28 jours et pour une substitution allant de 5 à 20 %, les résistances à la flexion sont comparables, en effet à 120 jours, la perte de résistance ne dépasse pas 6 % pour une substitution de 20% par rapport au mortier témoin.

Kerbouche. A 09: a trouvé que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers est réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle, cette dernière s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme. L'incorporation d'un taux de pouzzolane 30 % au CPA s'avère efficace puisque la résistance du mortier devient comparable à celle du mortier témoin.

Mebrouki. A, Cyr. M, Bouhamou. N, Belas Belaribi. N 06:

Ils ont étudié le comportement mécanique de mortier incorporant une pouzzolane naturelle Algérienne, Ils ont montré que :

-Au jeune âge et jusqu'à 28 jours les résistances des différents mortiers sont inversement proportionnelles à la quantité de la pouzzolane substituée.

Au-delà de 28 jours, l'effet de la pouzzolane devient perceptible, puisque les résistances avec 10, 20 et 30 % de pouzzolane s'approchent (compression) ou dépassent (flexion) les résistances du béton témoin sans pouzzolane.

-A long terme (après 60 jours), ces trois mélanges présentent des résistances supérieures à celle de béton témoin.

Les mortiers contenants entre 0 et 40 % de pouzzolane développent des retraits évoluent dans un même fuseau.

-A court terme (4 jours), le retrait diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane.

-A moyen et long terme, l'utilisation entre 10 et 40 % de pouzzolane entraine des retraits égaux ou inférieurs à ceux du témoin.

Semcha. A 06: a fait une étude comparative de la pouzzolane artificielle à base de vase calcinée avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

-Il a confectionné des pates avec une substitution de 10, 15, 20, 25, 30 % de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée.

-Pour des pourcentages inférieurs à 20 % la pouzzolane naturelle donne des résistances plus élevées que la vase calciné, pour des pourcentages entre 20 et 30% les résistances pour la vase calcinée deviennent plus élevées.

-Il a confectionnée par la suite des mortiers avec une substitution de 25% de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée comparée à un béton témoin.

- Le mortier à base de pouzzolane naturelle a un comportement proche de celui à base de ciment seul. Sa substitution au ciment constitue une économie sans en faire perdre les caractéristiques de résistance.

- Le mortier à base de vase calcinée aux courtes échéances présente de plus faibles résistances, mais à 28 jours les valeurs obtenues ont dépassé celles de la pouzzolane naturelle

et même que l'effet pouzzolanique s'est traduit par des résistances meilleures que celles du témoin.

Besseghier. N 08 : Elle a montré dans son étude que :

-Les résistances du béton avec 10 % de substitution de la vase calcinée est les meilleurs de touts les autres bétons à base de vase (15, 20%), et tendent en fin de parcours de rapprocher de celles du béton témoin.

-Les résistances au jeune âge sont d'autant plus faible que le taux de vase substituée est élevée mais à des âges plus avancés (28 jours et plus) ; elles ont tendance à rejoindre celle du béton témoin.

-A un jour le béton témoin affiche des performances mécaniques plus développées puisqu'il atteint plus de 50% de sa résistance à la compression à 28 jours, alors que les bétons à base de vase ne dépassent pas 43% de leur résistance à 28 jours et à la même date (43 % pour PV10, 40% pour BV15, 39% pour BV20)

-A 7 jours, le béton témoin développe plus 72% de sa résistance à la compression à 28 jours, alors que le BV 10 atteint 77%, le BV15 78% et le PV 20 78% de leur résistance à 28 jours à la même date.

-A 60 et 90 jours, les bétons à base de vase évoluent nettement plus vite que le béton témoin, c'est l'activité de la vase qui a été déterminante.

-Un dosage de 10 % de vase substituée au ciment serait optimal pour développer rapidement des résistances à court terme. A 60 et 90 jours le béton à base de 20% de vase se voit ses résistances évoluer plus rapidement par rapport aux autres bétons.

Chikouche. M 08: a étudié l'effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires

-Les résistances mécaniques diminuent en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout pouzzolanique (vase et marne argileuse).

-Les résistances mécaniques sont moins élevées pour les bétons avec 10, 20, 30 % de vase et de celui de marne argileuse par rapport au béton témoin et à l'âge de 28 jours leurs résistances s'approchent de celle béton témoin.

Benkaddour. M, Kazi Aoual. F, et Semcha. A 09:

Ils ont étudié Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle avec des pourcentages de substitution de 10%, 20% et 30%, ils ont montré 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 pouzzolane artificielle (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 pouzzolane naturelle diminue la résistance à la compression de 36.68%,6.16% et 24.45% à 2j, 7j et 28 jours respectivement.

- La résistance à la compression des mortiers qui contiennent 10% de pouzzolane artificielle et ceux qui contienne 10% de pouzzolane naturelle rejoint celle du témoin à 28 jours.

- 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.

Problématique et objectifs

Des millions des mètres cubes des sédiments sont dragués annuellement et jetés dans la nature, ces sédiments sont considérés comme un déchet qui pose un problème majeur pour l'environnement.

Il existe de nombreuses voix de valorisation, matériaux de remplissage, de remblaiement, couche d'assise de chaussée, béton, brique…

On a choisi dans notre étude de valoriser la vase dans le béton comme un substitut partiel de clinker, cette valorisation permet de réduire la consommation thermique et les émissions de gaz carbonique $C0_2$.

Les pouzzolanes (naturelles ou artificielles) ont fait l'objet de plusieurs recherches, la majorité des études effectuées dans le domaine de génie civil à la recherche de nouveaux produits cimentaires ont avancées qu'une substitution d'un pourcentage de ciment portland avoisinant les 20% par ces pouzzolanes peut confère au béton dans lequel elles sont incorporées, des performances mécaniques qui égalent ou même dépassent à long terme celle du béton témoin à base de ciment seul.

Cette étude a pour objectif d'étudier l'influence de la substitution de clinker par la vase calciné issue des opérations de dragage de barrage de Fergoug sur les propriétés mécaniques à court terme, avec un pourcentage de substitution de 20%.

Chapitre III
Expérimentation

III-1-Caractéristiques des matériaux utilisés :

III-1-1- Le Ciment portland artificiel :

Le ciment utilisé dans notre étude pour la confection de nos bétons est un CPA CEMI 42,5 fourni de la cimenterie de Zahana.

III-1-1-1- Composition chimique :

La composition chimique de CPA a été effectué au laboratoire de cimenterie de zahana est indiqué dans le tableau-7.

Tableau-7- *Composition chimique de CPA*

Oxyde	Teneur
SiO_2	20,90
Al_2O_3	5,10
Fe_2O_3	5,63
CaO	63,93
MgO	1,45
Na_2O	0,17
K_2O	1,43
SO_3	0,86
Perte au feu	0,86
Insoluble	0,60

III-1-1-2- Caractéristiques physique :

Les caractéristiques physiques sont illustrées dans le tableau-8.

Tableau-8-*Caractéristique physique de CPA*

Caractéristiques Physiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g /cm^3)	1.18
Masse volumique absolue (g/cm3)	3.13
Surface spécifique de Blaine (cm2/g)	3180

III-1-1-3-Composition minéralogique :

La composition minéralogique de ciment étudié est déterminée par la formule de bogue, et présentée dans le tableau-9.

Tableau-9- *composition minéralogique des clinkers selon la formule de Bogue*

Constituants minéralogiques du clinker	Teneur en % rapportée au clinker
C_3S	59,03
C_2S	15,71
C_3A	3,99
C_4AF	17,11
Régulateur de prise	4,16

III-1-2- Les ajouts minéraux :

III-1-2-1-La Vase :

Les vases étudiées sont prélevées en aval du barrage de Fergoug (Algérie) dans la zone de rejet après dragage.

III-1-2-1-1-Préparation de la vase :

La vase est séchée par passage à l'étuve à 110 C°, broyée et tamisée par voie sèche au tamis de 80 μm.

La calcination a été effectuée par petites quantités, en fonction de la capacité des fours disponibles. Les opérations de cuisson ont nécessité certaines précautions : pour éviter les chocs thermiques la vitesse de cuisson a été réglée à 5 degrés par minute, la température de cuisson (750 °C) a été maintenue constante pendant 5 heures. Le produit ainsi obtenu (vase calcinée) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité. Des précautions analogues de conservation du ciment utilisé ont été observées dans le but de conserver fixes les variables dues aux caractéristiques du ciment utilisé. (Conservation en petites quantités prêtes à l'emploi, à l'abri de l'air et de l'humidité). [SEMCHA.A.06]

III-1-2-1-2-Composition chimique :

La composition chimique de la vase a été effectué laboratoire de la société SIBELCO (France) est représentée dans le tableau-10.

Tableau-10- *composition chimique de la vase*

Oxyde	Teneur
SiO_2	54,59
Al_2O_3	15,49
CaO	14,15
Fe_2O_3	7,50
MgO	3,08
Na_2O	0,41
K_2O	2,89
SO_3	0,23
Perte au feu	1,87
Total	100,21

III-1-2-1-3-Caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques sont illustrées dans le tableau-11.

Tableau-11-*Caractéristiques physiques de la vase*

Caractéristiques Physiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g /cm^3)	1.22
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.62
Surface spécifique de Blaine (cm2/g)	7964

III-1-2-1-4-Analyse minéralogique :

III-1-2-1-4-1-Diffraction au rayon X :

Le diffractomètre par rayon X est destinée à déterminer la composition et les principaux caractères de la structure cristallographique des matériaux.

Un cristal est un arrangement régulier (ordonné) d'atomes (ou d'ions) dans l'espace. On résonne souvent sur un cristal plan plus facile à représenter. Le diffractomètre permet d'explorer toutes les directions de l'espace pour mesurer des pics de diffraction correspondant à chacun des nœuds du réseau donc il forme une véritable signature de la phase cristalline au sein d'un mélange, à condition d'avoir auparavant déterminé la signature de chaque phase. Soit à l'état stable ou en ligne d'une phase intermédiaire, grâce au développement des moyens technologiques.

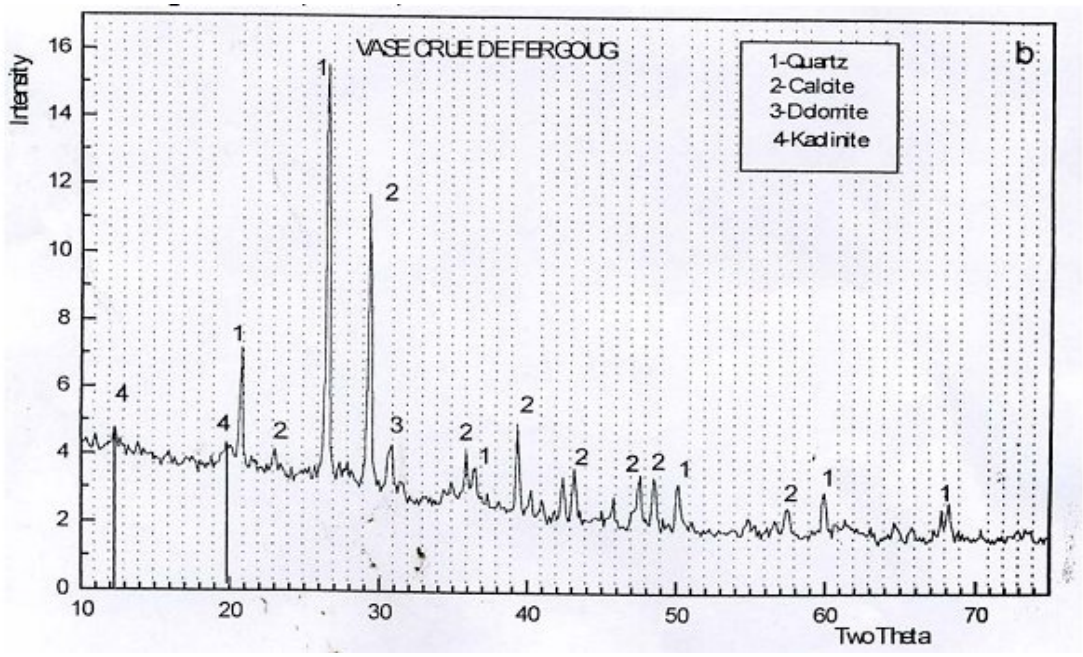


Figure-15-*Courbe DRX de la vase de Fergoug [SEMCHA.A.06]*

III-1-2-1-5-Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a été réalisé au laboratoire de la société SIBELCO (France) est représentée dans la figure-16 et le tableau-12.

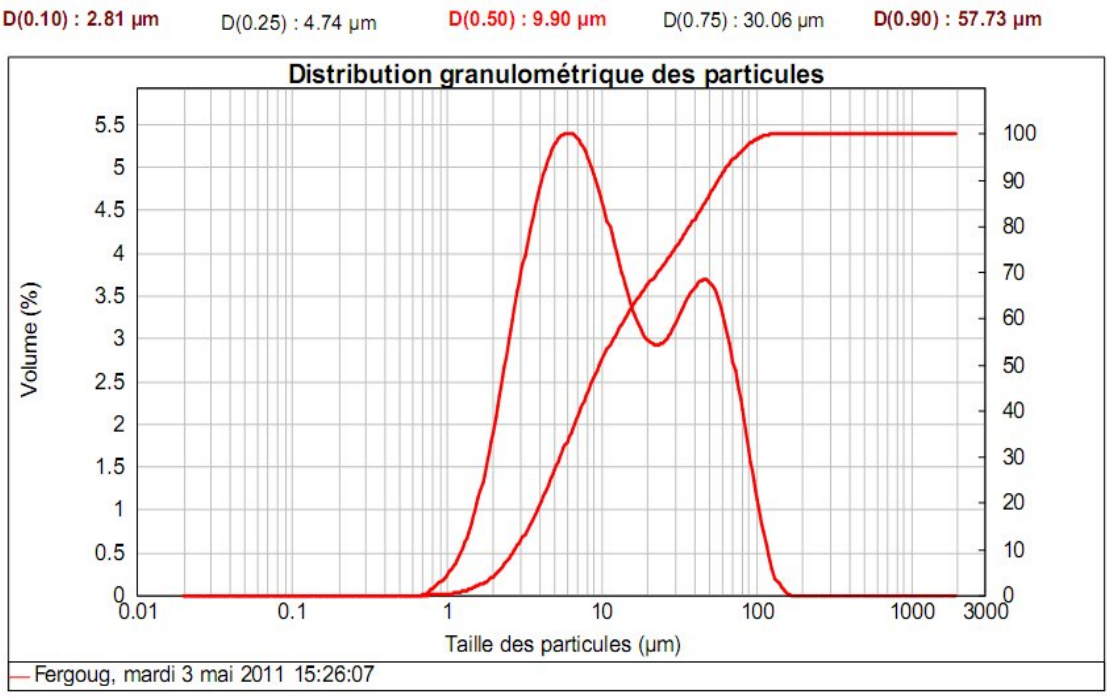


Figure-16- *courbe granulométrique de la vase*

Tableau-12- *Analyse granulométrique au laser de la vase*

Taille (µm)	Passant en %	Taille (µm)	Passant en %	Taille (µm)	Passant en %	Taille (µm)	Passant en %
0.020	0.00	12.000	55.55	90.000	97.69	315.000	100.00
0.100	0.00	16.000	62.53	100.000	98.67	350.000	100.00
0.500	0.00	20.000	67.09	106.000	99.07	400.000	100.00
1.000	0.21	25.000	71.35	125.000	99.78	425.000	100.00
2.000	4.09	30.000	74.96	150.000	99.99	450.000	100.00
3.000	11.48	40.000	81.30	160.000	100.00	500.000	100.00
4.000	19.46	50.000	86.64	180.000	100.00	600.000	100.00
5.000	26.78	60.000	90.86	200.000	100.00	630.000	100.00
6.000	33.14	63.000	91.90	212.000	100.00	800.000	100.00
8.000	43.14	75.000	95.19	250.000	100.00	850.000	100.00
10.000	50.32	80.000	96.19	300.000	100.00	1000.000	100.00

III-1-2-1-6-Limites d'Atterberg :

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande [norme NF P 94 051]. L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau, induisant la fermeture, sur 1 cm, d'une rainure préalablement formée dans le matériau. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture sur un centimètre pour 25 chocs.

La limite de plasticité est déterminée par la méthode du rouleau [norme NF P 94 051]. Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau du cylindre qui se brise en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3 mm.

Les essais ont été effectué au laboratoire LTPO est représenté dans le tableau-13.

Tableau-13-*Limites d'Atterberg de la vase*

Paramètre	Valeurs (%)
WL (%)	33,98
WP (%)	18,15
Ip (%)	15,83

III-1-2-1-7-Vérification des propriétés pouzzolaniques de la vase calciné :

- La somme des trois oxydes doit être >70% selon la norme ASTM C 618 qui indique que le matériau est pouzzolanique.

$$(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3) = 77,58\ \% > 70\%$$

- L'indice d'activité pouzzolanique I est calculé en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier normal sans addition et ce contenant 25% de la vase calciné.

$$I=R_{C28}M_{25}/R_{C28}M_0$$

$$0,67 < I = 0,94 < 1$$

- La teneur en verre est calculée à partir de la composition chimique en faisant la différence entre les teneurs de la chaux et la silice, cette valeur doit être supérieure à 34%.

$$\text{Silice - Chaux} = 40,44\ \% > 34\%$$

La vase calciné vérifiée les trois caractères ce qui prouve son caractère pouzzolanique, et permet de son utilisation comme ajout pouzzolanique.

III-1-2-2 –Pouzzolane naturelle :

La pouzzolane utilisée est extraite de gisement de Beni Saf (Algérie).

III-1-2-2-1 -Composition chimique :

La composition chimique de la pouzzolane a été effectué au laboratoire de la société SIBELCO (France) est représentée dans le tableau-14.

Tableau-14- *Composition chimique de pouzzolane*

Oxyde	Teneur
SiO_2	46,67
Al_2O_3	17,31
CaO	9,40
Fe_2O_3	10,64
MgO	4,76
Na_2O	4,71
K_2O	2,1
SO_3	0,05
Perte au feu	4,95
Total	100,59

III-1-2-2-2-Caractéristiques physique :

Les caractéristiques physiques sont illustrées dans le tableau-15.

Tableau-15-*Caractéristique physique de la pouzzolane*

Caractéristiques Physiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g /cm^3)	0.83
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.73
Surface spécifique de Blaine (cm2/g)	7023

III-1-2-2-3- Analyse minéralogique :

L'analyse de la pouzzolane par la diffraction des rayons x est présentée sur la figure 17.

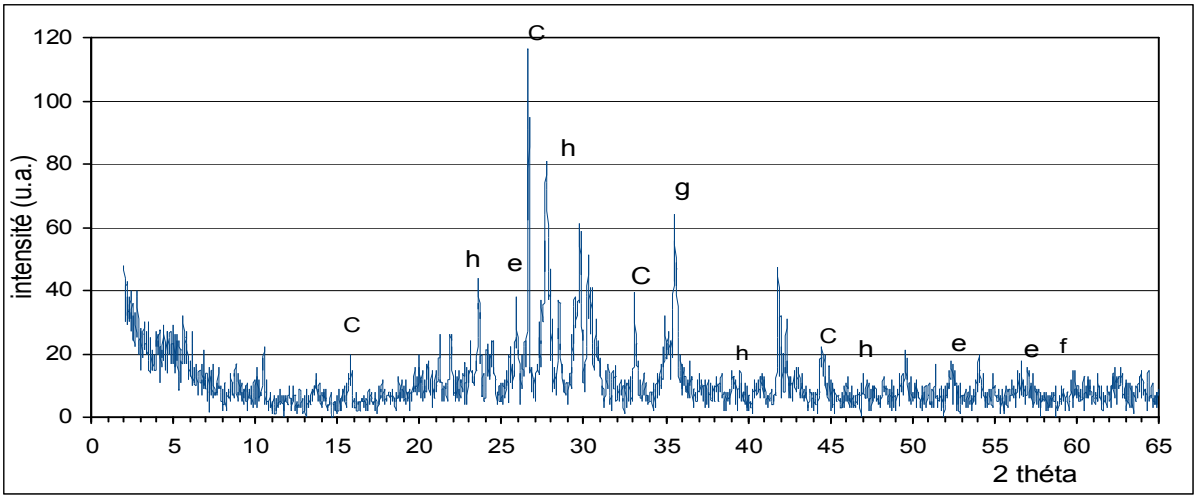
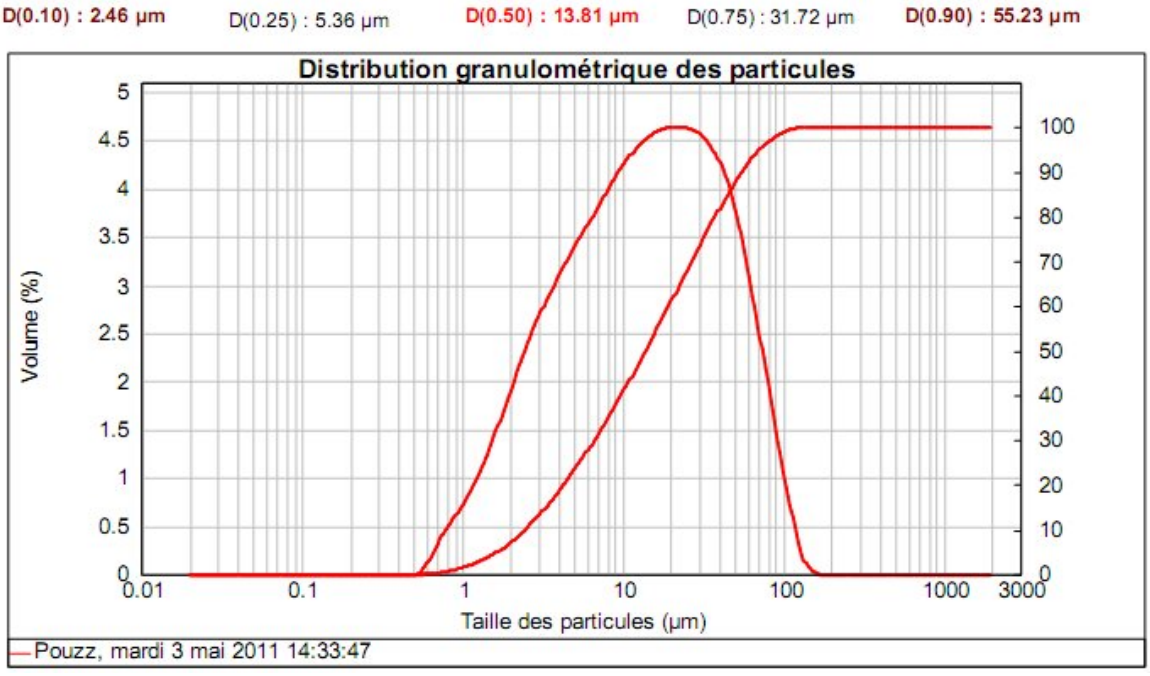


Figure-17- *Diffractométrie aux rayons X (DRX) de la pouzzolane naturelle [57].e : Alumine (Al2O3); f: Silicate de Magnesium (MgSiO3), g: Fe2O3, h : Oxyde de Calcium (CaO) [Sayad.H 10].*

III-1-2-2-4- Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a été réalisé au laboratoire de la société SIBELCO (France) est représenté dans la figure-18 et le tableau-16.



Figue-18-*Courbe granulométrique de pouzzolane*

Tableau-16- *Analyse granulométrique de pouzzolane*

Taille (µm)	Passant en %	Taille (µm)	Passant en %	Taille (µm)	Passant en %	Taille (µm)	Passant en %
0.020	0.00	12.000	45.89	90.000	97.99	315.000	100.00
0.100	0.00	16.000	54.37	100.000	98.85	350.000	100.00
0.500	0.00	20.000	61.10	106.000	99.20	400.000	100.00
1.000	1.45	25.000	67.85	125.000	99.84	425.000	100.00
2.000	7.11	30.000	73.34	150.000	100.00	450.000	100.00
3.000	13.24	40.000	81.71	160.000	100.00	500.000	100.00
4.000	18.68	50.000	87.63	180.000	100.00	600.000	100.00
5.000	23.42	60.000	91.81	200.000	100.00	630.000	100.00
6.000	27.60	63.000	92.79	212.000	100.00	800.000	100.00
8.000	34.74	75.000	95.78	250.000	100.00	850.000	100.00
10.000	40.74	80.000	96.67	300.000	100.00	1000.000	100.00

III-1-2-2-5-Vérification des propriétés pouzzolaniques de la pouzzolane naturelle :

- La somme des trois oxydes doit être >70% selon la norme ASTM C 618 qui indique que le matériau est pouzzolanique.

$$(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3) = 74,62\ \% > 70\%$$

- L'indice d'activité pouzzolanique I est calculé en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier sans addition et celle contenant 25% de la pouzzolane naturelle.

$$I=R_{C28}M_{25}/R_{C28}M_0$$

$$0,67 < I = 0,86 < 1$$

- La teneur en verre est calculée à partir de la composition chimique en faisant la différence entre les teneurs de la chaux et la silice, cette valeur doit être supérieure à 34%.

$$\text{Silice - Chaux} = 37,27\ \% > 34\%$$

La pouzzolane naturelle vérifiée les trois caractères ce qui prouve son caractère pouzzolanique, et permet de son utilisation comme ajout pouzzolanique.

III-1-3- Les granulats :

Les granulats utilisés dans la confection des bétons proviennent de la carrière de Kristel située dans la région d'Oran.

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique des granulats (fins et gros) ont été déterminées au laboratoire de l'université d'Abd Al Hamid Ibn Badis

III-1-3-1-Caractéristiques physiques :

III-1-3-1-1-Sable :

III-1-3-1-1-1-Masse volumique absolue ou masse spécifique :

Elle est déterminée par la méthode de l'éprouvette graduée,
La valeur moyenne de la masse spécifique des échantillons testés est :

γ_s= 2,64 g/cm^3

III-1-3-1-1-2-Masse volumique apparente ou masse volumique :

La valeur moyenne de la masse volumique apparente du sable testé est:

ρ_s = 1,49 g/cm^3

III-1-3-1-1-3-Equivalent de sable :

Cet essai consiste à déterminer la proportion d'impuretés argileuse, limoneuse ou ultrafine dans le sable. Le principe de la mesure repose sur la différence de vitesse de sédimentation des grains contenus dans le sable.

L'essai consiste à plonger 120 g de sable dans une solution floculante. Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes .Ensuite on mesure la hauteur dans l'éprouvette normalisée du sédiment (H_1) et du sédiment + le floculat (H_2).

$$E.S = — \times 100$$

L'équivalent de sable est autant plus élevé que la teneur en argile est plus faible.

La valeur d'équivalant de sable visuel est :

ES (moyen) = 87,04%

La valeur d'équivalent de sable à piston est :

ESV (moyen) = 92,24 %

Le sable est propre et de faible pourcentage de fines et convient aux bétons de qualité [Festa.J,Dreux.G 98]

III-1-3-1-1-4-Module de finesse :

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse MF. Il représente la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Plus le module de finesse est faible plus le sable est riche en éléments fins. Le module de finesse (MF) doit être compris entre 2.2 et 2.8.

Pour notre cas : MF = 2,63

III-1-3-1-1-5-La porosité :

La porosité d'un matériau est le rapport du volume des vides au volume total, elle est déterminée par la relation suivante:

$$Ps\ (\%) = (1-(\rho/\gamma))\ x100$$

Pour le cas de notre sable. Ps= 43,56%

III-1-3-1-2-Les pierres concassées (gros granulats) :

Les dimensions de graviers concassés utilisés dans notre travail expérimental sont le 3/8 et le 8/15.

III-1-3-1-2-1-Masse volumique absolue ou masse spécifique :

Elle est déterminée par la méthode de l'éprouvette graduée,

La masse volumique absolue de gravier (3/8) est :

$\gamma\ (3/8) = 2,68\ g/cm^3$

La masse volumique absolue de gravier (8/15) est :

$\gamma\ (8/15) = 2,65\ g/cm^3$

III-1-3-1-2-2-Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente de gravier (3/8) est :

$\rho\ (3/8) = 1,44\ g/cm^3$

La masse volumique apparente de gravier (8/15) est :

$\rho\ (8/15) = 1,46\ g/cm^3$

III-1-3-1-2-3- Coefficient d'absorption des graviers utilisés :

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

- Principe de mesure :

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 200c. le coefficient d'absorption est défini par la relation suivante :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} 100$$

Ms = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 1050c.

Ma = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit :

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.

L'abortion de gravier (3/8) et (8 /15) est : Ab = 0,55%

III-1-3-2-Caractéristiques chimiques :

III-1-3-2-1-Composition chimique de sable de carrière :

La composition chimique de sable de carrière est représentée dans le tableau-17.

Tableau-17-*Analyse chimique de sable de carrière*

Compositions	**Teneurs (%)**
SiO_2	2.06
CaO	54.58
MgO	0.14
Al_2O_3	Nul
Fe_2O_3	0.13
SO_4	Nul
CL	Nul
Perte au Feu	43.32
Total	100.23
Carbonates	97.13
CO_2	43.00
H_2O	0.32
Sulfates Solubles	Nul
Matières organiques	Nul

La teneur en CaO confirme le caractère calcaire du sable.

III-1-3-2-2-Composition chimique de sable de mer :

La composition chimique de sable de mer est représentée dans le tableau-18 :

Tableau-18- *Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar*

Compositions	**Teneurs (%)**
SiO_2	75.05
CaO	10.34
MgO	0.25
Al_2O_3	0.95
Fe_2O_3	2.67
SO_4	0.065
CL	/
Perte au Feu	10.26
Total	99.58
Carbonates	25.49
CO_2	11.20
H_2O	0.87
Sulfates Solubles	/
Matières organiques	/

III-1-3-3-Analyse granulométrique (tamisage à sec) :

L'analyse granulométrique a pour objet de déterminer ou de définir la grosseur des grains qui constituent les granulats (le sable et la pierre concassée) et le pourcentage de chaque grosseur.

Eviter la confusion fréquente entre :

- **Granulométrie** : science qui a pour but la détermination des dimensions des grains.
- **Granularité** : étude de la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Les classes granulaires d'un matériau pulvérulent sont déterminées par essai granulométrique.

Le jeu de tamis fractionne le matériau pulvérulent en plusieurs classes granulaires, il est choisi en fonction de la nature du matériau et de la précision exigée.

- Tamis : dans lesquels l'organe de séparation est constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des trous carrés.

- Passoires : dans lesquels l'organe de séparation est constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des trous circulaires.

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série composée du module 23 au 38. C'est un facteur très important qui nous permet de juger la qualité du sable.

III-1-3-3-1-Analyse granulométrique de sable :

L'analyse granulométrique de sable corrigé est présentée dans la figure-19 :

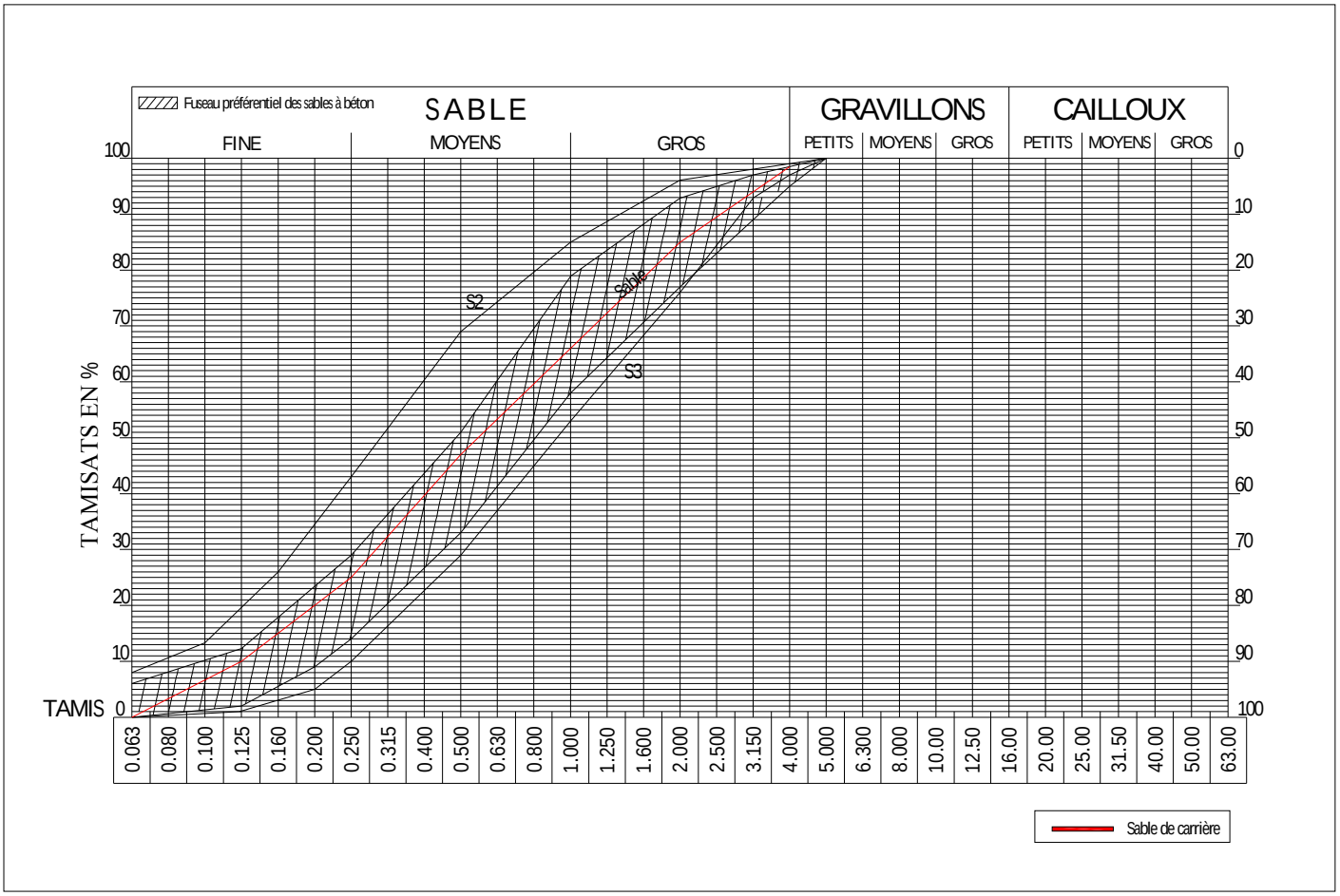


Figure-19- Analyse granulométrique du sable corrigé

III-1-3-3-2-Analyse granulométrique des granulats utilisés :

Les courbes granulométrique des granulats utilisés sont illustrées sur la figure-20

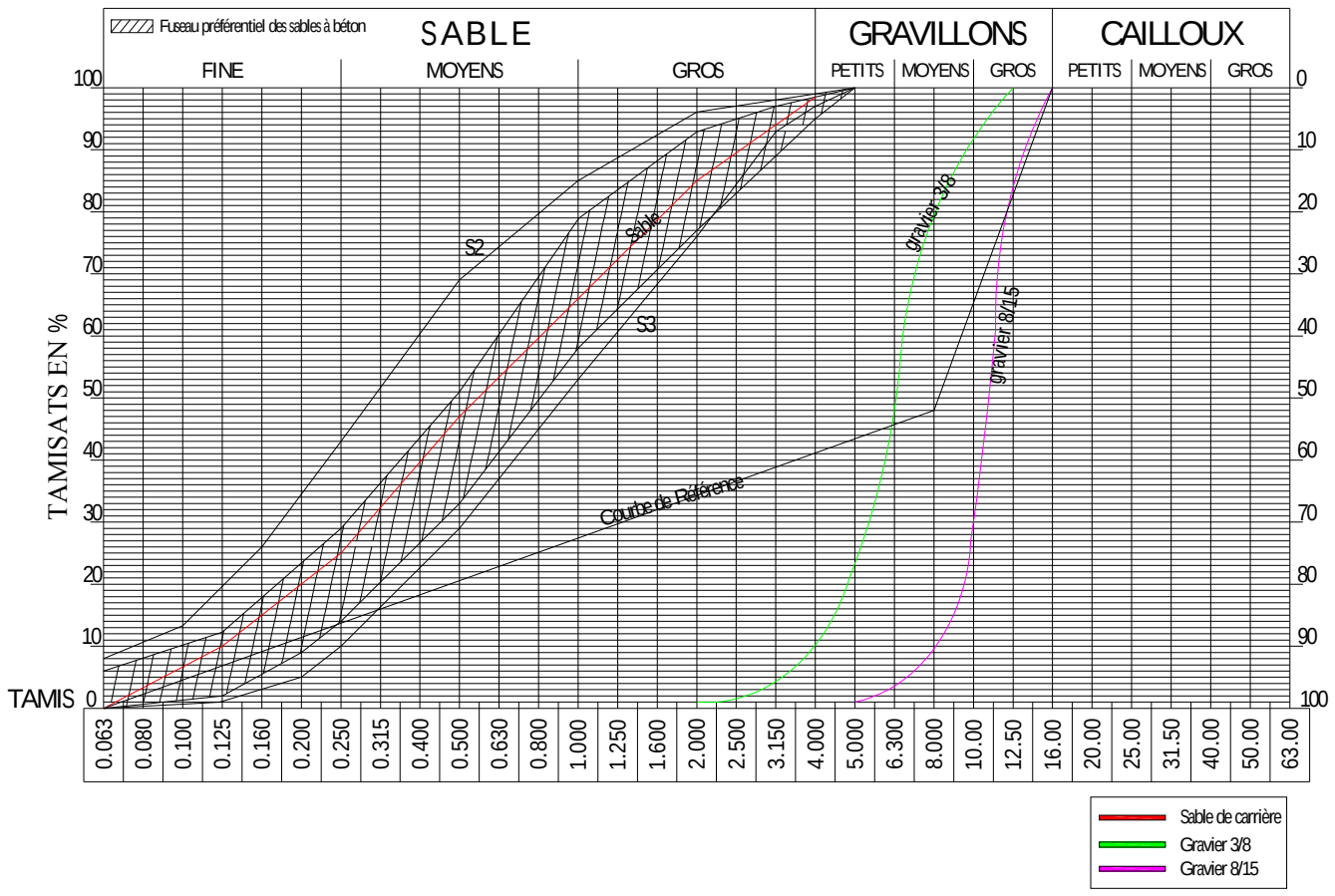


Figure-20-*Courbes granulométriques des granulats utilisés*

III-1-4- L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton et du mortier doit être pure que possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc. ..

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable « eau du robinet» fournie au laboratoire de Génie-civil à l'université de Mostaganem. L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire LTPO.

Tableau-19- *Analyse chimique et minéralogique de l'eau de gâchage utilisée.*

Paramètres organoleptiques	Unité		Norme AF P 18 303
Couleur	Unit	Claire	-
Odeur	Dilut	Bonne	-
Gout	Dilut	Bon	-

Paramètre physico-chimiques	Unité		-
PH		7,94	≥ 4
Potentiel redox Eh	MV	-60,6	-
Conductivité à 20 °C	µs/cm	1926	-
Turbidité	NTU	2,05	-
Oxygène dissous	Mg/l	5,47	-
Salinité	%	09	-
CO_2 libre	Mg/l	9,26	-
CO_2 Total	Mg/l	223,96	-

Paramètre de pollution			-
Ammonium	Mg/l	00	-
Nitrate	Mg/l	8,6	≤ 500

D. Minéralisation			
Calcium	Mg/l	200	≤ 2000
Magnésium	Mg/l	37,2	≤ 2000
Chlorures	Mg/l	265	≤ 2000
Sulfates	Mg/l	760,48	≤ 2000
Bicarbonate	Mg/l	244	-
Carbonate	Mg/l	00	-
Dureté total (TH)	F°	80,5	-
Dureté permanente	F°	60,5	-
Titre alcalin complet	F°	20	-
Fer	F°	0,04	-

Cette eau est acceptable pour la confection du béton et du mortier étudiés (tableau-19).

L'analyse chimique réalisée de l'eau de gâchage utilisée dans notre travail expérimental confirme la bonne qualité de cette eau (composition acceptable selon les exigences).

III-2 Méthodes d'essais:

III-2-1 Essai sur le ciment anhydre :

III-2-1-1-La masse volumique absolue :

III-2-1-1-1- Objectif de l'essai :

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue (ou poids spécifique) de ciment utilisé.

La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé «densimètre Le Chatelier».

III-2-1-1-2-Conduite de l'essai :

- Peser m = 64 g de ciment ;
- Introduire du benzène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 ; Vo = 250 cm^3 ;

- Placer le densimètre dans le bain thermostatique à température constante (20°C ± 2°C);

- Corrigé éventuellement le niveau (0) après la stabilisation de la température pendant 20mn ;

- Introduire la quantité de ciment pesé dans le densimètre;

- Chasser les bulles d'air, en agitant doucement, en faisant tourner le densimètre ;

- Remettre à nouveau le densimètre dans le bain thermostatique ;

- Après la stabilisation du niveau, lire dans la graduation supérieure du densimètre, le volume du ciment introduit, soit V_1 et

- Calculer la masse volumique absolue du ciment en g/cm^3

$$\rho = m / (V_1 - V_0)$$

III-2-1-2-Mesure de la finesse du ciment :

III-2-1-2-1- Objectif de l'essai :

Déterminer la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. Elle est exprimée en cm²/g, conformément à la norme EN-196-6

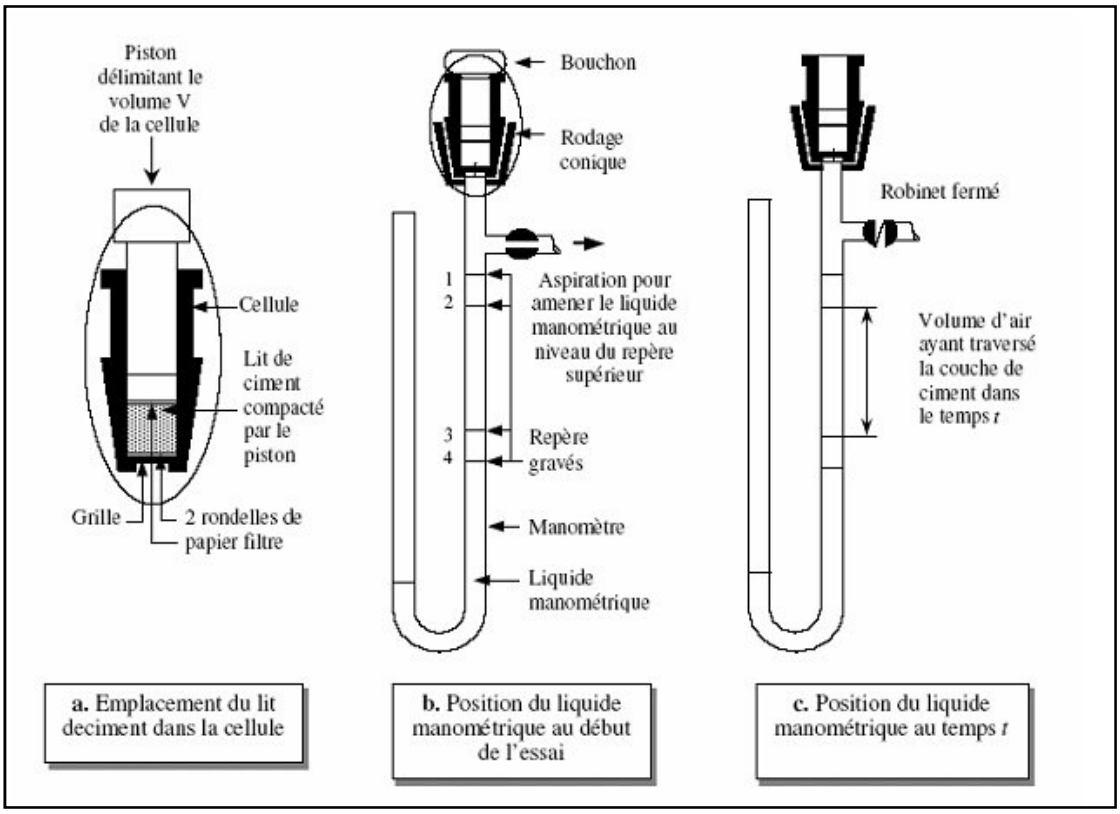


Figure-21- *Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine*

III-2-1-2-2- Principe de l'essai :

Il s'agit de faire passer un volume d'aire 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. La surface massique est proportionnelle à $t^{1/2}$.La masse volumique du ciment étant connue.

III-2-1-2-3- Equipement nécessaire utilisé :

- Une sale maintenue à 20°C± 2°C et à une humidité relative de 65%;
- Un appareil appelé « perméabilimètre de blaine » dont la description complète est donné par la norme EN 196-6 ;
- Une balance précise à 0.001g près ;
- Un chronomètre précis à 0.2 s près ;
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule et
- Un thermomètre précis à 0.1 °C.

III-2-1-2-4-Conduite de l'essai :

- Peser une masse m_C de ciment telle que la porosité une fois tassé dans la cellule soit égale à 0.5.
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston ;
- Mettre la cellule à sa place dans le rodage conique au sommet du manomètre ;
- Fermer le robinet et enlever le bouchon ;
- Déclencher le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère N°2 sur le tube ;
- Arrêter le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère N°3 sur le tube et
- Relever le temps t à 0.2 s près.
- Calculer la surface spécifique du ciment

$$= \frac{. \ / \ . \ /}{(1 - \ ). (0{,}1 \ \ )/} \qquad (\ \ / \ )$$

Avec :

K : constante de l'appareil ;

γ : masse volumique du ciment en g/cm^3 ;

η : viscosité de l'air à la température de l'essai en poise ;

t : temps de passage de l'air dans la couche de poudre de ciment en seconde ;

m : est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine , $m = \gamma_c .v.e$;

v = 1.837 volume de la cellule et

e = porosité du ciment dans la cellule.

III-2-2-Essais sur la pate de ciment :

III-2-2-1-Essai de consistance :

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

Pour apprécier la consistance des trois types de ciments composés utilisés avec leurs finesses de mouture différentes, on a effectué l'essai avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN-196-3.

III-2-2-1-1-Objectif de l'essai :

Déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage qui définit une telle consistance dite «consistance normalisée».

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps.

III-2-2-1-2- Principe de l'essai :

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

III-2-2-1-3- Equipement nécessaire utilisé :

- Une sale maintenue de manière continue à 20°C± 2°C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%;

- Un malaxeur décrit dans la norme EN 196-1 ;

- Un appareil de Vicat muni ;

- d'une sonde d'un diamètre φ = 10 mm ;

- d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et de diamètres 70 et 80 mm ;
- d'une tige coulissante équipée sur laquelle vient se placer la sonde (la masse totale « tige + sonde » est de 300 g) ;
- une plaque en verre qui sert comme base pour le moule ;
- une graduation (réglable en hauteur) permet de mesurer la distance qui sépare le dessous de la sonde de la plaque de base et
- Une balance précise à 1 g près.

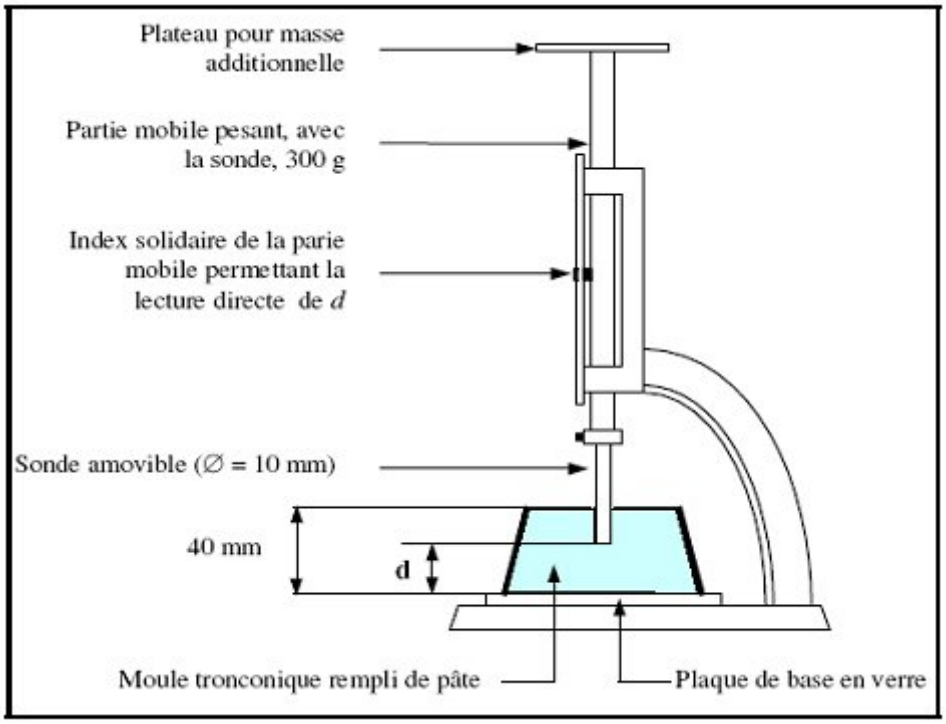


Figure-22- *Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance*

III-2-2-1-4- Conduite de l'essai

- Peser 500 g de ciment ;
  125 g d'eau ;
- Verser l'eau dans le récipient du malaxeur puis ajouter le ciment en un temps compris entre 5 et 10 s. La fin du versement du ciment donne le temps 0;
- Ajouter 500 g de ciment à l'eau, en un temps compris entre 5 et 10 s. La fin du versement du ciment donne le temps 0 ;
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s ;
-Arrêter le mouvement, démonter le batteur et récipient, racler les parois du récipient puis remonter le tout en une durée d'environ 15 s;

- Remettre le malaxeur en marche pour une durée de 90 s à vitesse lente ;
- Remplir le moule tronconique de la pâte fabriquée et araser la face supérieure ;
- Placer le moule et son support sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser la sonde au contact de la pâte ;
- Régler l'index des graduations au point 0 et
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale.

La sonde s'enfoncera plus ou moins profondément dans la pâte alors dans la pâte.

- Noter l'indication de l'index sur la graduation après immobilisation de la partie mobile.
- Si l'épaisseur mesurer est supérieure à 7 mm ; il n'y a pas assez d'eau.
- Si l'épaisseur mesurer est inférieure à 5 mm ; il y a trop d'eau.
- La pâte sera de consistance normalisée si l'épaisseur d = 6 mm ± 1.

III-2-2-2-Essais de prise :

III-2-2-2-1- Objectif de l'essai :

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

III-2-2-2-2-Principe de l'essai :

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

- l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérer l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que d = 4 mm ± 1 mm La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenu un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

III-2-2-2-3-Equipement nécessaire utilisé :

- Une armoire maintenue d'une manière continue à une température de 20°C± 2°C et à une humidité relative supérieure ou égale à 90%;
- Appareil de Vicat est équipé de :
- d'une aiguille de 1,13 mm + porte aiguille

- masse mobile de 1000g (partie mobile 300g + masse supplémentaire 700g)

III-2-2-2-4-Conduite de l'essai :

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

- confectionner une pâte normalisée comme indiqué au II-2-2-1-Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;

- Remplir le moule tronconique, et araser la face supérieure ;

- Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;

- Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil ;

- Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;

- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale ;

- Relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;

- si l'arrêt se produit à une distance d = 4mm ±1mm ; La prise est commencée ;

- si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que d = 4mm±1mm et

- On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base.

III-2-3 Essai mécanique sur le béton :

III-2-3-1 Essai de compression :

Les détails d'exécution et toutes les précautions à prendre sont précisés dans la norme P 18-406.

L'essai de compression est l'essai le plus commun effectué sur le béton durci, d'une part que c'est un essai facile à exécuter, et d'autre part parce que la plupart des propriétés caractéristiques souhaitables du béton sont qualitativement liées à sa résistance à la compression.

III-2-3-1-1-Principe de l'essai :

Soumettre l'éprouvette étudiée à une charge croissante jusqu'à la rupture. En déduire la résistance à la compression.

III-2-3-1-2-Expression des résultats :

$$= - (\qquad)$$

Avec : Rc = résistance à la compression en MPa ,
F = charge de rupture en newtons ;
d = Section de l'éprouvette en mm^2.

III-2-3-2 Essai de traction :

Il n'y a actuellement aucune procédure d'essais normalisés pour déterminer la résistance à la traction directe du béton, c.-à-d., la résistance sous la traction uniaxiale. C'est dû à la difficulté impliquée en induisant la traction axiale pure dans une éprouvette sans présenter des concentrations de contrainte localisées. La connaissance de la résistance à la traction du béton est importante parce qu'elle détermine la résistance à la fissuration. Par conséquent, plusieurs procédures d'essais ont été élaborées pour indiquer indirectement la résistance à la traction du béton.

III-2-3-2-1 Essai de traction par flexion :

De la norme P 18-407 et (ASTM C 293) qui précise les détails d'exécution, il convient de retenir les points suivants :

- les éprouvettes sont des prismes de section carrée et d'élancement 4 ;
- l'appareil de chargement est réalisé conformément au croquis de la figure-23.

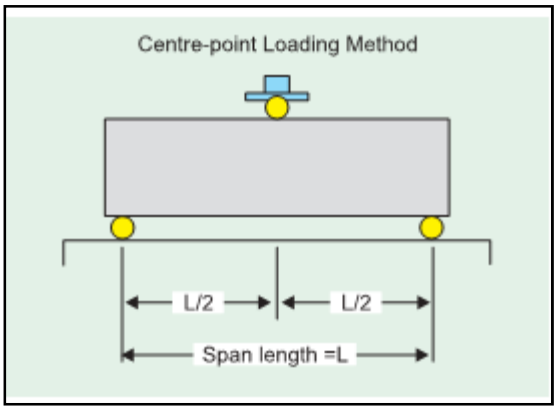


Figure-23- *Principles of flexural testing*

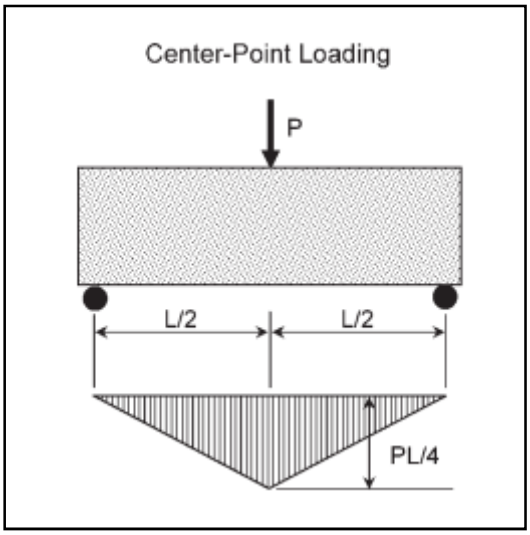


Figure-24- *Bending diagrams for center-point loading*

La mise en charge s'effectue à la vitesse de 0,05 MPa par seconde avec une tolérance de ± 0.01 MPa.

III-2-3-2-1-1-Expression des résultats :

$$= \frac{1{,}8}{} \quad (\qquad\qquad)$$

Avec : = la contrainte de rupture à la traction en MPa ,

F = charge de rupture en newtons ;

a = Section de l'éprouvette en mm^2.

En effet :

$$= \frac{}{} = \frac{6}{} = \frac{3}{} \qquad \frac{=}{2} \times \qquad - = \frac{}{6}$$

III-2-3-2-2-Essai de traction par fendage :

La norme NF P 18-408 précise en particulier les dispositions de mise en charge.

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse.

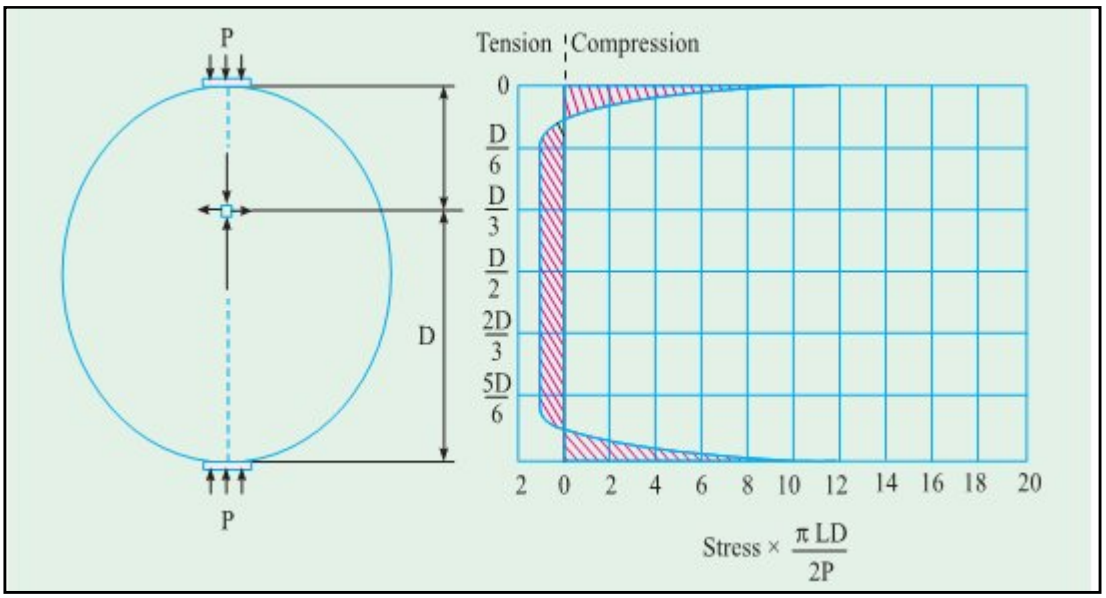


Figure-25- *l'essai de fendage*

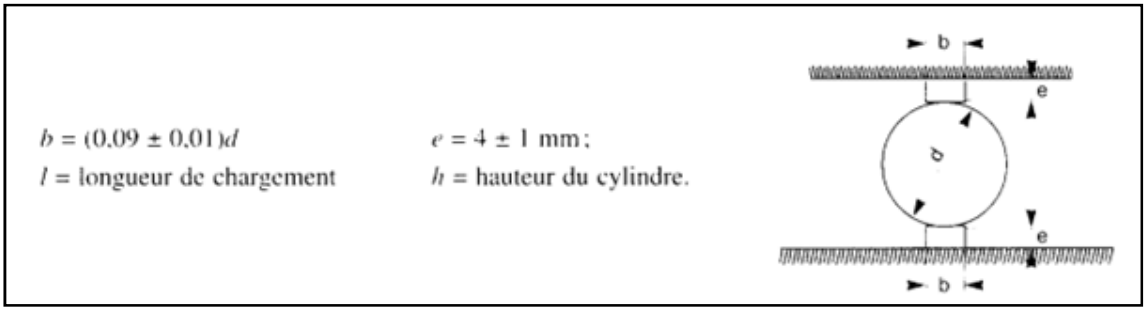


Figure-26-*Dispositif de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour L'essai de fendage*

Cet essai nécessite que les éprouvettes présentent des génératrices bien rectilignes.

- La mise en charge s'effectue à la vitesse de 0,05 MPa/s avec une tolérance de ± 0,01 MPa par seconde.

III-2-3-2-2-1-Expression des résultats :

$$(\qquad) = 0{,}637\frac{}{h}\quad'\qquad é \qquad\qquad = \frac{2}{}\frac{}{h}$$

Avec : F = charge de rupture en newtons,

d = diamètre de l'éprouvette, en m m ;

h = hauteur de l'éprouvette, en mm.

Ce type d'essai, quelquefois appelé « essai brésilien », présente un certain nombre d'avantages:

- même moule et même éprouvette que pour l'essai de compression (ce qui est très important en ce qui concerne l'influence pour la conservation du paramètre «forme») ;

- même presse et dispersion relativement faible et

- le résultat est obtenu sans utilisation d'un coefficient plus ou moins arbitraire.

Figure-27- *Eprouvette issue de l'essai de fendage après rupture.*

III-2-3-3-Essai de retrait :

Les détails d'exécution et toutes les précautions à prendre sont précisés dans la norme NF P15-433.

III-2-3-3-1- Principe de l'essai :

Mesurer en fonction du temps la variation de la longueur de l'éprouvette prismatique de béton.

Les mesures ont lieu au démoulage de l'éprouvette 280 x 70 x 70 mm, puis régulièrement jusqu'à 28 jours.

III-2-3-3-2-Expression des résultats :

- La variation de longueur au temps t :

$$\Delta l(t) = L(t) - L_0$$

Avec : - L_0 : La longueur initial de l'éprouvette lors de démoulage et

- L(t) : La longueur de l'éprouvette au temps

- La variation relative de la longueur :

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t) / L$$

Avec : - L = 280,00 mm

Figure-28- *Dispositif de l'essai retrait*

III-2-4 Composition de béton :

Afin de confectionner un béton, un mélange doit être soigneusement élaboré. Multiple sont les méthodes proposées par les spécialistes, tels que Bolomey, Abrams, Faurey, Vallette, Dreux et Gorisse , pour arriver à produire un mélange optimal de granulats, de ciment et d'eau d'un mètre cube, dont les qualités soient celles recherchées pour la construction d'un ouvrage.

Ces méthodes sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes. Ils existent celles qui sont dites à « granularité continue » lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue, ces méthodes permettent d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité. On dit par contre que l'on a une « granularité discontinue »lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires, ce qui conduit en général à des résistances en compression un peu supérieure, mais parfois au détriment de l'ouvrabilité.

Parmi ces méthodes nous avons choisi la méthode Dreux-Gorisse, ou se qu'on appel «Méthode des abaques ».

III-2-4-1 Dosage en ciment et en eau :

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée, de la qualité du ciment et des granulats.

Dans notre étude on a fixé E/C à 0,5 pour les trois bétons.

Le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée. Ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque (figure 29) suivant.

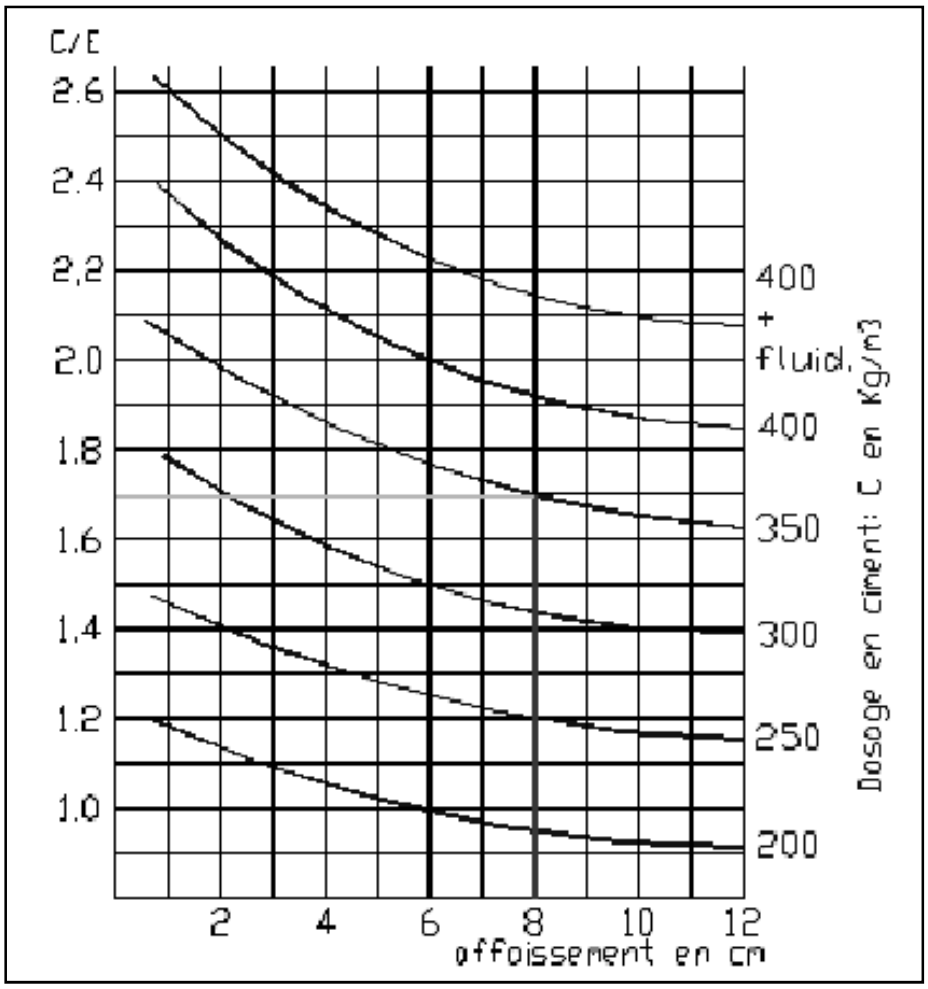


Figure-29 *- Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [Festa.j et Dreux.G98]*

La détermination du dosage en ciment s'obtient par cet abaque à double entrée. En abscisse, la valeur de l'affaissement désirée et en ordonnée le rapport C/E. L'intersection des deux entrées, indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment en kg. Cette intersection des deux entrées peut se faire directement sur une courbe de dosage en ciment, dans le cas contraire la courbe du dosage en ciment est obtenue par extrapolation de celles connues.

Figure-30-*Essai d'étalement*

De même le dosage en ciment est limité à 400 kg/m3 de béton en place. Au-delà le ciment et l'eau seraient en trop forte concentration dans le béton. Cela aurait pour effet de produire des fissures de retrait.

Ainsi, pour des rapports C/E et une ouvrabilité à atteindre qui nécessiteraient plus de 400kg de ciment, le dosage en ciment est limité à 400kg et l'ouvrabilité désirée est atteinte en ajoutant un fluidifiant au béton.

III-2-4-2 Ajustement du dosage en eau :

Le dosage en eau est à ajuster. En effet L'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange. Or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est petit (tableau 20). La quantité d'eau dépend donc également du diamètre des grains à humidifier. Le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal, D=25mm. Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre, D.

Diamètre en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction en %	+15	+9	+4	0	- 4	- 8	-12

Tableau-20- *Correction en pourcentage sur le dosage en eau [Festa.j et Dreux.G98]*

III-2-4-3-Adjuvant :

Pour la confection des éprouvettes de mortier avec un rapport E/C égal à 0.5, on a utilisé un adjuvant plastifiant réducteur d'eau (BV40) provenant de l'entreprise SIKA avec un dosage de 0.35 % du ciment, cet adjuvant est un liquide brun foncé, de densité égale à 1.19 – 0.01 et un pH égal à 7±1.

III-2-4-4-Courbe granulaire de référence :

Les granulats ont été examinés et jugés satisfaisants : leurs courbes granulaires sont représentées sur le graphique de la Figure-31.

- le point de brisure A de la courbe granulaire de référence est à l'abscisse D/2 (mm).

- son ordonnée est $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

K : est terme de correction qui dépend du dosage en ciment, la forme des granulats et la nature de vibration et qui sera aussi corrigé en fonction du module de finesse du sable : $Ks = 6\ M_f - 15$

D : la plus grande dimension des granulats utilisés (D=15mm)

- Le point B à l'ordonnée 100% qui correspond au plus grand diamètre.

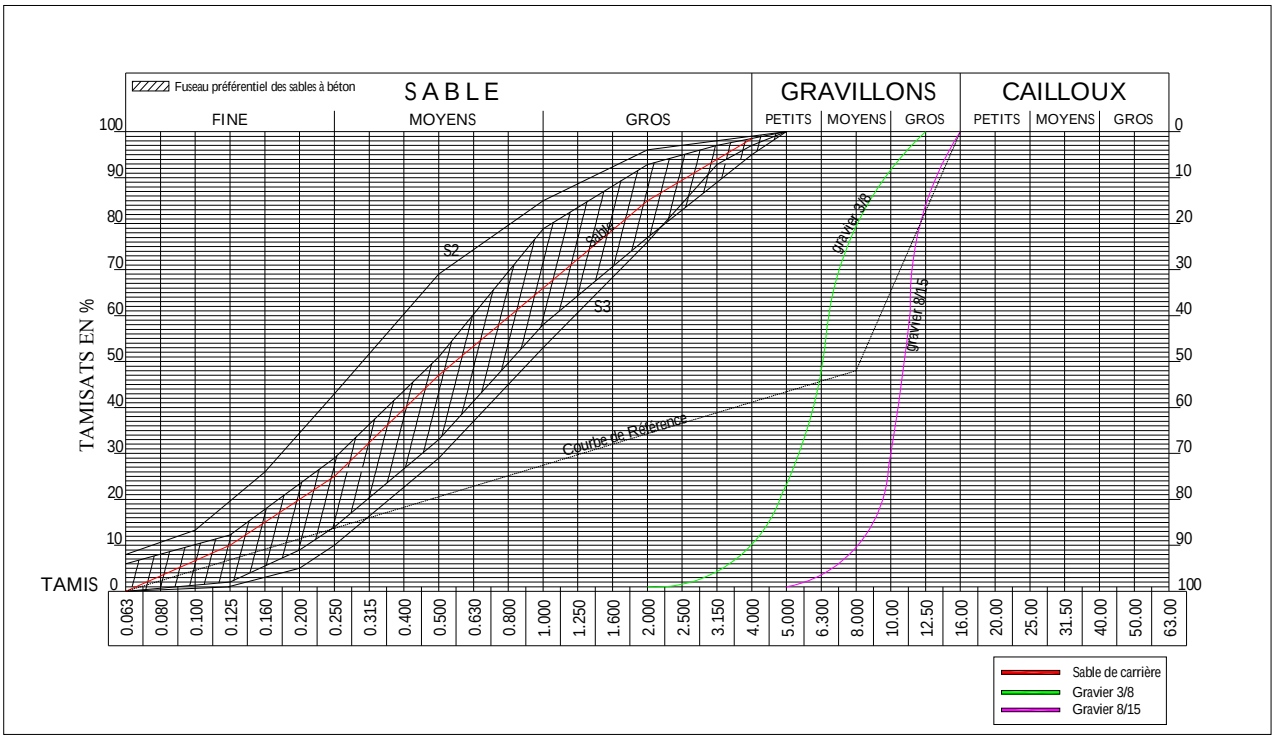


Figure-31- *Courbe granulométriques des granulats utilisés et de référence.*

On peut tirer de ces courbes les dosages des différents constituants de nos bétons qui sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau-21- *Composition des bétons*

Désignation	**Ciment Kg/m^3**	**S/L (%)**	**Substituant Kg/m^3**	**Sable Kg/m^3**	**Gravier 3/8 (Kg/m^3)**	**Gravier 8/15 (Kg/m^3)**	**Eau (Kg/m^3)**	**E/L**	**Adjuvant (%)**
BOT	400	/	/	697,20	469,11	647,83	200	0.50	0.35
BOV 20%	320	20	80	697,20	469,11	647,83	200	0.50	0.35
BOP 20%	320	20	80	697,20	469,11	647,83	200	0.50	0.35

Chapitre IV
Résultats Expérimentaux
Et Interprétation

IV-1-Analyse des propriétés des ciments :

IV-1-1-Composition des mélanges étudiés :

Les différentes variantes des ciments sont obtenues avec un mélange de CPA et la vase calcinée ou bien la pouzzolane naturelle, avec un pourcentage de 20 % suivant le tableau si dessous.

Tableau-22- *Composition des mélanges étudiés*

Désignation	CPA	Vase calciné	Pouzzolane naturelle
BT	100%	0%	0%
BV 20%	80%	20%	0%
BP 20%	80%	0%	20%

IV-1-2 Influence des ajouts sur le poids spécifique et la finesse du ciment :

Les résultats du Tableau-23 présentent l'effet de l'addition minérale (pouzzolane naturelle et vase calcinée) sur le poids spécifique et la finesse du ciment. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Une réduction du poids spécifique pour les ciments avec ajouts.
- Une augmentation de la finesse pour les ciments avec ajouts.

Selon les résultats obtenus, on note que la substitution de ciment par l'ajout a un effet significatif sur le poids spécifique de ciment. Ceci pourrait être dû à la faible densité des ajouts et leur finesse élevée.

Tableau-23- *Poids spécifique des ciments préparés*

Types de ciments	BT	BP20%	BV20%
Finesse (cm^2/g)	3180	3950	4140
Poids spécifique (g/cm^3)	3,13	3,05	3,03

IV-1-3 Influence de l'ajout pouzzolanique sur la pate de ciment :

IV-1-3-1 Influence des ajouts sur la consistance et la prise :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau -24 et 25) présentent l'effet des ajouts (pouzzolane naturelle et vase calcinée) sur la consistance normale de la pâte de ciment. La demande de l'eau des pâtes de ciments préparées est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat. Selon les résultats obtenus, on note que l'ajout de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée incorporée dans le ciment a un double effet:

- Augmentation de la quantité de l'eau requise pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment.
- Diminution des temps de début et fin de prise.

Tableau-24-*Consistance pour chaque composition de pate*

Ciments préparés	**BT**	**BP20%**	**BV20%**
Dosage en eau	125	130	140,5

Ceci pourrait être du à la surface spécifique élevée de l'ajout ce qui demande une plus grande quantité d'eau afin de mouiller toute la surface de ciment.

- La demande en eau pour la pate confectionnée avec la vase calcinée est plus élevée que celle confectionnée avec la pouzzolane naturelle.

Tableau-25-*Début et fin de prise des ciments préparés*

Ciments préparés	**BT**	**BP20%**	**BV20%**
Début de prise (minute)	171	159	152
Fin de prise (minute)	247	221	207
Temps de prise	76	62	55

- La pate confectionnée avec la vase calcinée a un début de prise plus rapide que celui de la pouzzolane naturelle.

- Le temps de prise de la pate confectionnée avec la vase calciné est moins de celui confectionnée avec la pouzzolane naturelle.

On constate que le temps de début de prise de la pate de ciment avec ajouts est plus faible que la pate confectionnée avec le CPA, ce phénomène pourrait être du à la finesse des ciments avec ajouts, cette finesse est plus importantes de celle de CPA, les hydrates se connectent alors plus rapidement entre eux.

IV-2- Analyse des propriétés des Bétons :

IV-2-1-Influence des ajouts sur la résistance à la compression :

Les résultats des essais de la résistance à la compression sont présentés sur la figure32:

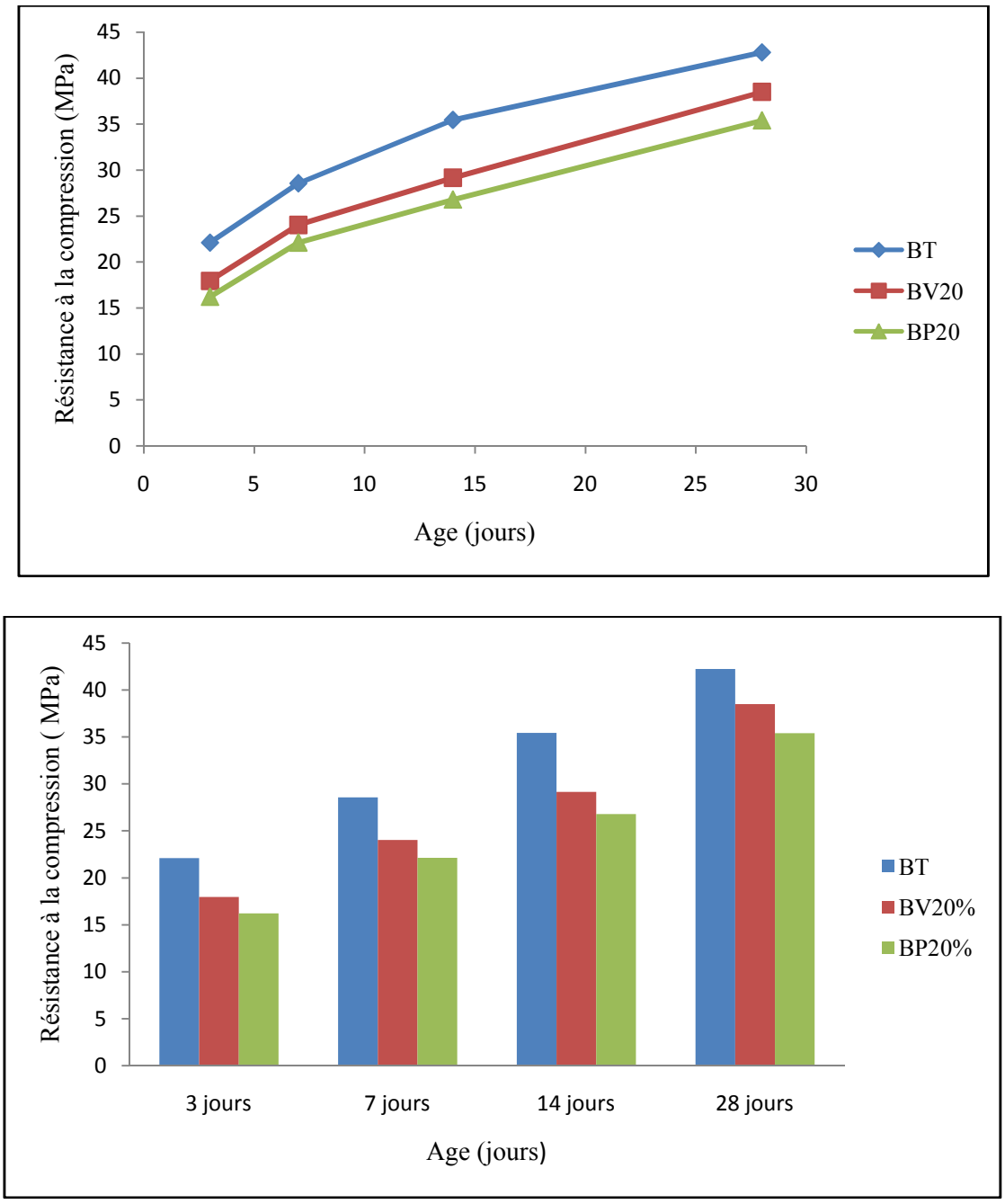


Figure-32-*Résistance à la compression des bétons en fonction du temps*

Les résistances augmentent régulièrement avec l'âge, la substitution du clinker par les ajouts fait amoindrir les résistances, car ces ajouts ont un effet de remplissage aux jeunes âges et la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante.

Les résistances obtenues avec les mélanges à base de vase calciné sont supérieurs à celles obtenues à base de la pouzzolane naturelle.

Les résistances des bétons avec ajouts commencent à s'approcher légèrement à celle du béton témoin à l'âge 28 jours.

- à 3 jours le béton témoin développe 52 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 47 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 46% de sa résistance à 28 j.

- à 7 jours le béton témoin développe 70% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 62% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 63% de sa résistance à 28 j.

- à 14 jours le béton témoin développe 84% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 76% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 76% de sa résistance à 28 j.

On constate que durant les premiers jours la résistance évolue moins rapidement pour les bétons avec ajouts donc, l'hydratation est plus lente que celle des ciments portland.

IV-2-2 Influence des ajouts sur la résistance à la traction:

Les résultats des essais de la résistance à la traction sont présentés sur la figure-33 et 34:

La mesure des résistances à la traction ont était obtenu par 2 types d'essai : traction par flexion et traction par fendage.

Les résistances augmentent régulièrement avec l'âge, les résistances de ciment avec ajouts approchent de celles de béton témoin à l'âge de 28 j.

Les résultats de l'essai de traction par fendage sont inférieurs à celles de l'essai de traction par flexion.

IV-2-2-1-Résistance à la traction par flexion :

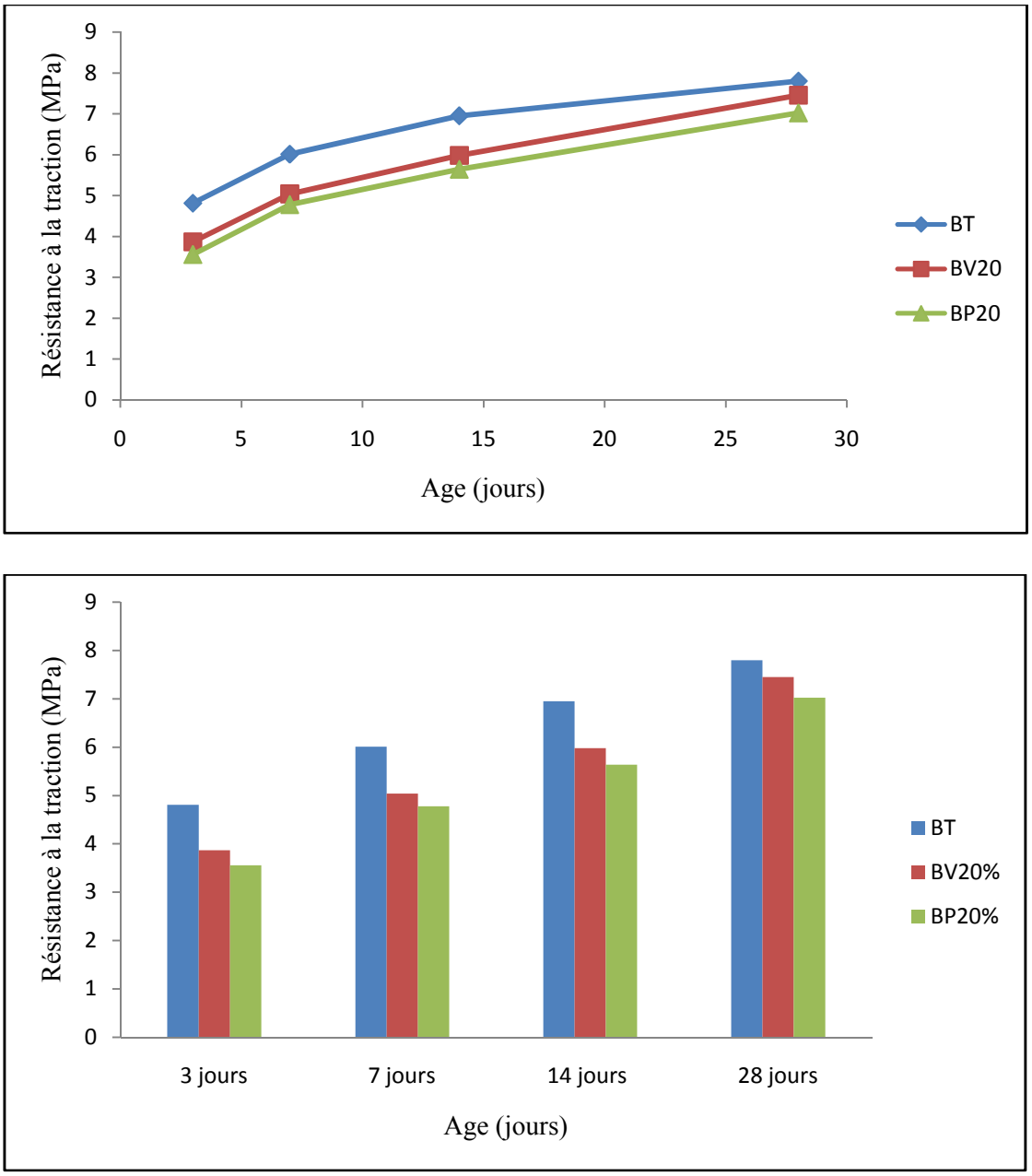


Figure-33-*Résistance à la traction par flexion des bétons en fonction du temps*

- à 3 jours le béton témoin développe 62 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 52 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 51% de sa résistance à 28j.

- à 7 jours le béton témoin développe 77% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 67% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 68% de sa résistance à 28j.

- à 14 jours le béton témoin développe 89% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 80% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 80% de sa résistance à 28j.

IV-2-2-2-Résistance à la traction par fendage :

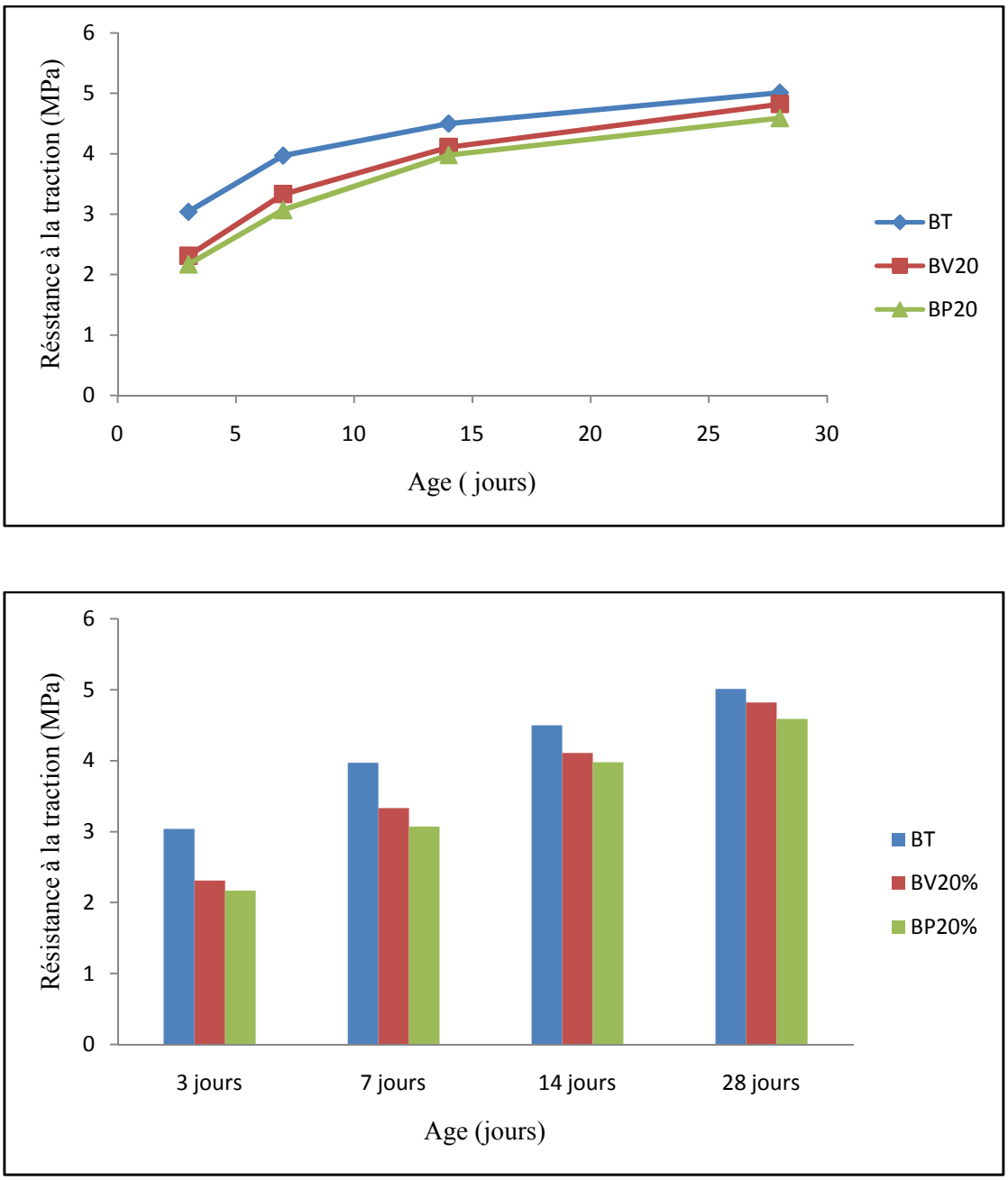


Figure-34-*Résistance à la traction par fendage des bétons en fonction du temps*

- à 3 jours le béton témoin développe 61% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 48% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 47% de sa résistance à 28j.

- à 7 jours le béton témoin développe 79% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 69% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 66 % de sa résistance à 28j.
- à 14 jours le béton témoin développe 90% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 85% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 87% de sa résistance à 28j.

On constate aussi pour les essais de traction que durant les premiers jours la résistance évolue moins rapidement pour le béton avec ajouts donc, l'hydratation est plus lente que celle de béton sans ajouts.

La résistance obtenue par fendage est plus représentative et utilisée dans la littérature du fait de sa simplicité.

De plus cet essai par rapport à l'essai de flexion trois points, est le moins perturbé par la zone de compression qui influe la valeur finale de la résistance.

IV-2-3-Influence des ajouts sur le retrait :

On a suivi l'évolution de retrait sur les différentes variantes jusqu'à l'âge de 28j, les éprouvettes sont conservées à l'air en contacte avec le milieu extérieur de la salle de conservation pour mesurer le retrait total et protégées du milieu extérieur pour mesurer le retrait endogène, les éprouvettes sont enrobées par une feuille en plastique et d'autre en aluminium.

Pour évaluer le retrait de dessiccation, on a fait la différence entre le retrait total et le retrait endogène.

Les figures 35-36-37 représentent l'évolution du retrait (endogène, total et de dessiccation) pour les trois variantes :

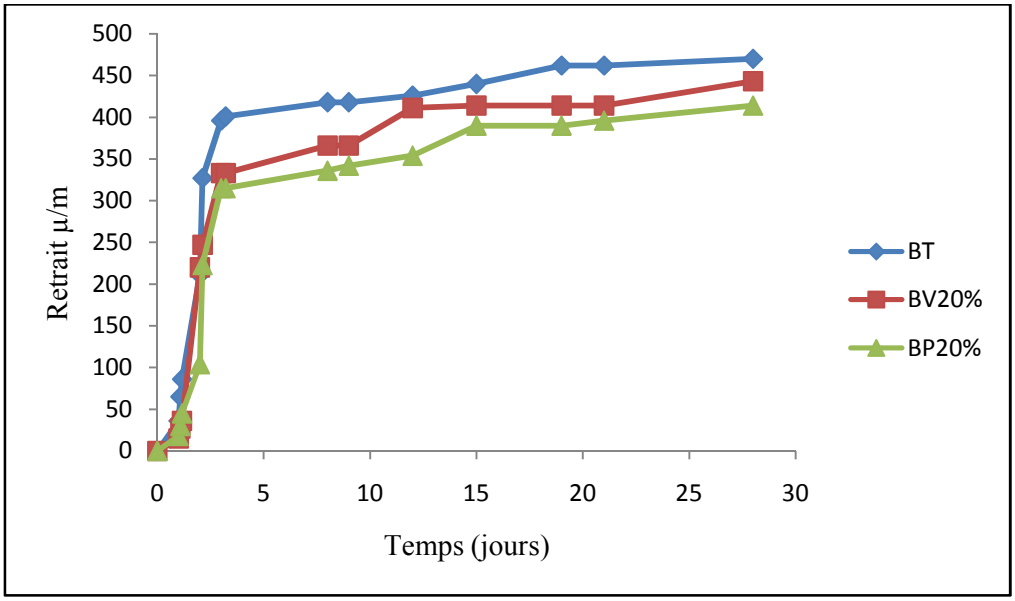


Figure-35- *Evolution du retrait endogène*

Le retrait endogène évolue dans le même fuseau, le béton sans ajouts présente un retrait plus élevé que les bétons avec ajouts.

Le béton avec pouzzolane artificiel présente un retrait proche de celui de pouzzolane naturelle.

Les réactions d'hydratation dans le béton sans ajouts sont plus élevées que de celles des bétons avec ajouts par conséquence le béton témoin consomme une quantité d'eau plus importante pour son hydratation.

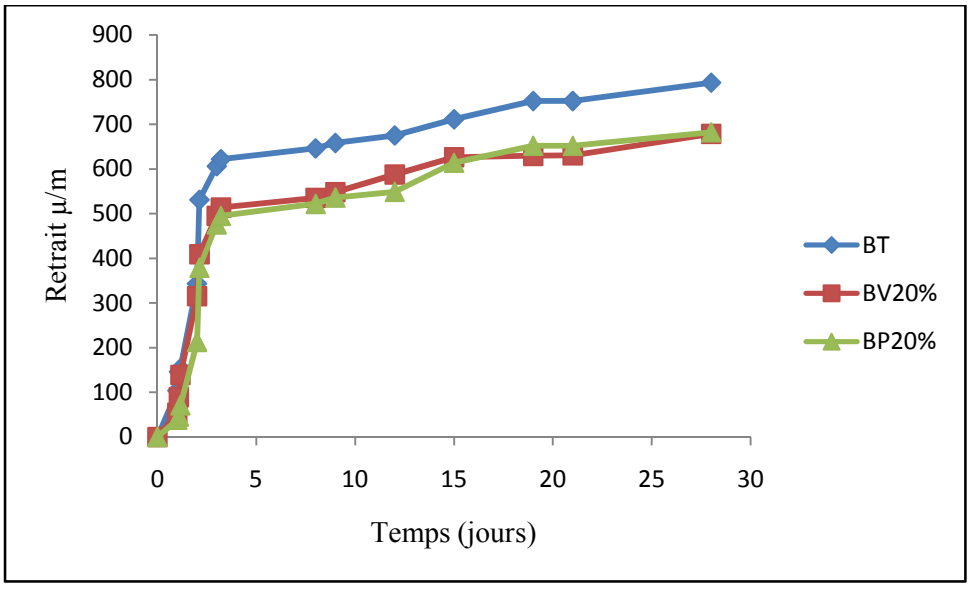


Figure-36- *l'évolution du retrait Total*

Le retrait total du béton sans ajouts est supérieur de retrait des bétons avec ajouts, les bétons avec ajouts présentent un retrait très proche.

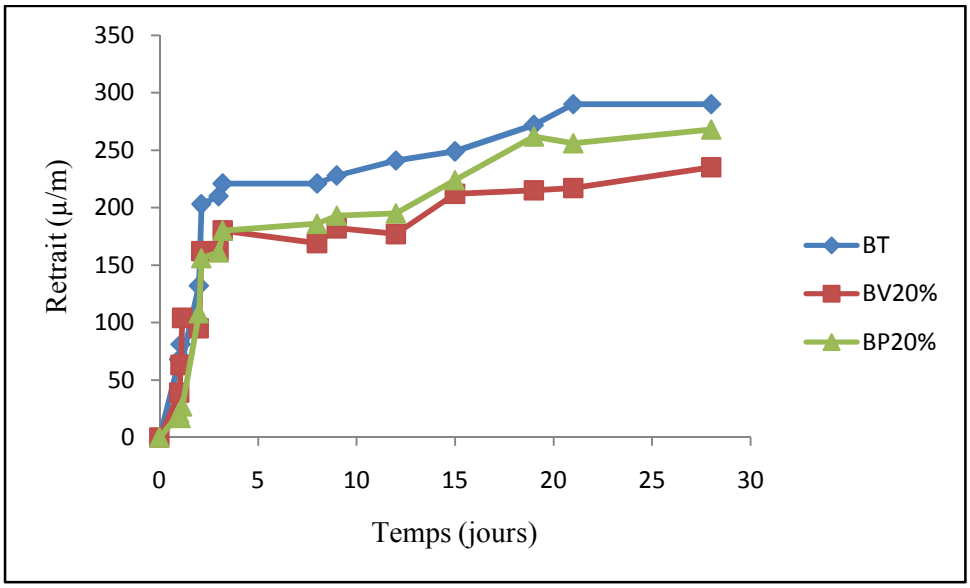


Figure-37- *Evolution de retrait de dessiccation*

Le béton sans ajouts présente un retrait de dessiccation plus élevé que les bétons avec ajouts.

La présence des ajouts est accompagnée par une modification de la microstructure et une augmentation du pourcentage des pores fins ce qui empêche l'évaporation de l'eau et réduit le retrait de dessiccation.

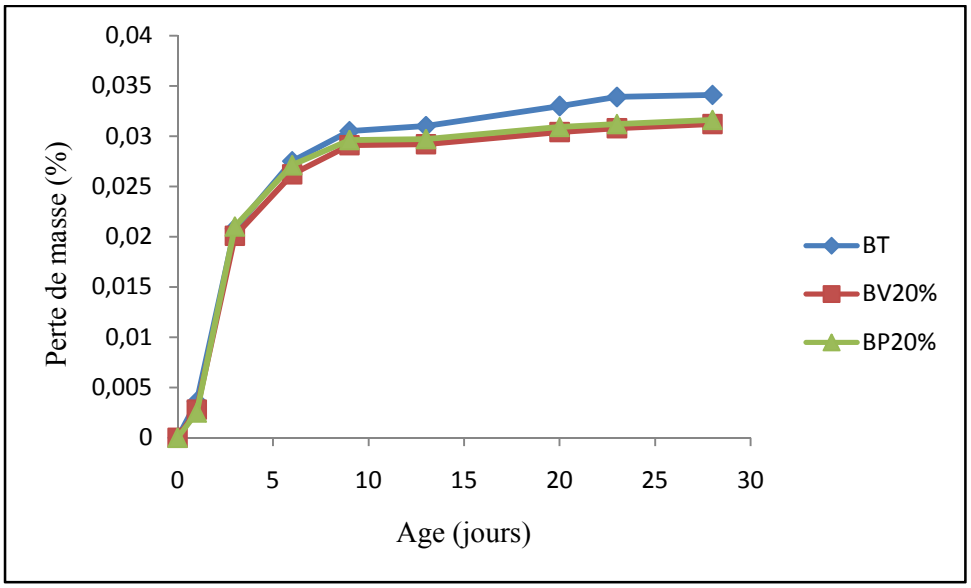
La diminution de la microstructure des pores du à la vase calcinée ou la pouzzolane naturelle peut engendrer une diminution d'eau disponible au séchage et donc limiter le retrait de dessiccation.

Le béton avec pouzzolane naturelle présente un retrait plus important que le béton avec vase calciné, la vase calciné a une finesse plus grande et réduit les pores plus que la pouzzolane naturelle, ce qui limite par conséquent le retrait.

IV-2-4 Influence des ajouts sur la perte de masse :

La perte de masse a été suivi par pesée régulières des éprouvettes prismatiques 7x7x28 avec une balance ayant une précision de 0,01 g.

La figure-38 représente l'évolution de la perte de masse pour les trois variantes :



Figue-38- *Evolution de la perte de masse*

La perte de masse de béton sans ajouts est supérieure de celle des bétons avec ajouts, la perte de masse de béton avec vase calcinée et très proche de celle de béton avec pouzzolane naturelle.

Les bétons avec ajouts possèdent une structure des pores plus fins et par conséquent, retiennent plus d'eau condensée au niveau capillaire, ce qui empêche l'évaporation de l'eau par conséquent présentent une perte de masse moins élevée.

Conclusion générale

Actuellement il est démontré largement que les sédiments dragués ont un impact négatif autant sur le volet environnemental que celui lié à l'économie. Cet impact est lié directement à la mise en dépôts de ces matériaux.

C'est dans le cadre du développement durable que nous est venue l'idée de la valorisation de ces déchets naturels, qui possèdent de nombreuses potentialités souvent ignorées. Les voies de valorisation sont nombreuses et on été explorées par de nombreux chercheurs dans le domaine de bâtiment comme alternatives aux méthodes traditionnelles de production des matériaux de constructions (granulats, sable, ajouts au ciment).

Les ciments avec ajouts sont actuellement les plus utilisés pour la confection des bétons, ces ciments présentent plusieurs avantages écologiques et économiques ainsi que pour l'amélioration de certaines propriétés des bétons.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la vase issue des opérations de dragages comme ajout au ciment du fait qu'elle présente des propriétés pouzzolaniques après traitement thermique (calcination afin de la rendre amorphe).

On a étudié les propriétés physiques de trois variantes de ciment à l'état anhydre et à l'état hydraté (poids spécifique, consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les caractéristiques des bétons confectionnés à la base de ces ciments, à savoir : les propriétés mécaniques (compression, traction), le retrait et la perte de masse. Nous retenons ce qui suit :

- L'augmentation du besoin en eau pour avoir une consistance normale pour les pates avec ajouts, ceci pourrait être due au fait que la surface de mouillage augmente avec l'incorporation d'ajout.
- L'accélération des délais ou temps de prise pour les pates avec ajouts cela pourrait être due à la finesse des ciments avec ajouts ce qui permet aux hydrates de se connecter plus rapidement entre eux.
- Le béton sans ajout présente des résistances meilleures de celles des bétons avec ajouts et l'activité pouzzolanique n'a pas un effet significatif aux jeunes âges. A l'âge de 28 jours les résistances des bétons avec ajouts commencent à s'approcher de celle de béton sans ajout. Les réactions d'hydratation sont en avance et les réactions pouzzolanique commencent à prendre effet par la suite. Cela se traduit par des résistances qui se rapprochent de celle de béton sans ajout à plus long terme.

- La pouzzolane artificielle présente des performances mécaniques meilleurs de celles de pouzzolane naturelle, cela pourrait être du aux conditions de traitement de la vase qui donne une garantie vis-à-vis d'impuretés contrairement à la pouzzolane naturelle qui subit les conditions d'extraction à ciel ouvert.
- Les bétons avec ajouts présentent un retrait inférieur de celui de béton témoin, les ajouts modifient et améliorent la microstructure de béton par leur finesse élevée, ce qui réduit la porosité et minimise le retrait.

Perspective (Futurs travaux) :

En perspective nous proposons les axes de recherches suivants :

1- Comparer avec d'autres produits pouzzolaniques telles que : la fumée de silice, les cendres volantes, le laitier .

2- Etude des effets des ajouts pouzzolaniques sur la durabilité et la résistance aux milieux agressifs des bétons.

3- Influence de la calcination de la vase sur les propriétés physico- chimique des ciments aux ajouts et les performances mécaniques des matériaux cimentaires.

4- Influences des ajouts sur l'interface pate- granulats, préciser le rôle de l'addition au niveau de l'interface.

Références Bibliographiques

Acker. P 88 : Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique. Thèse de Doctorat. ENPC Paris,1988 , p121.

Agence de l'eau 02 : Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués - Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments. [en ligne], 2002, p126. Disponible sur : <http://www.eau-artoispicardie.fr/>

Amroise. J, Murat. M, Pera. J 85 : Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals .IV-Experimental conditions for strength improvment on métakaolinite minicylinders. cement and concrete research ,1985, vol 15,n° 2 , p83-88.

Baroghel. B 94: Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.

Baron.J, Ollivier.J.P et Weiss.J.C 99: Les bétons, bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles,Troisième tirage, 1999, P 3-12.

Barron.J, Sauterey.R 82: Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.1982, p 559.

Benkaddour. M, Kazi Aoual.F et Semcha.A 09: Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle, Article de LABMAT, département de génie civil, ENTSET d'Oran, 2009.

Bernard et Cool 01 : Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete, Materials and Structures, Vol. 34, France, 2001, p 266-272.

Bernard. O, Ulm. F-J, Lemarchand. E 03: A multiscale micromechanics-hydration model fir the early age elastic properties of cement-based materials. Cement and Concrete Research, vol. 33, 2003, p. 1293-1309.

Berraih. M 10: Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre, thèse de magistère à l'ENSET d'Oran, 2010

Besseghier. N 08: Valorisation de la vase du barrage de Fergouge pour son utilisation dans le béton, thèse de magistère à l'université de Mostaganem, 2008.

Bich C 05: Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin :évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique, thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité génie civil, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005,p 44-45

Bjontegaard 99 : Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete, Ph.D. thesis of NTNU, Trondheim, 1999, p256 .

Bjontegaard et Sellevold 85 : Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete, Materials and Structures, Vol. 34, France, 2001, p266-272.

Blombled .J.P 85: liants à bas coût pour les pays en développement, Rapport de fin de contrat Rexcoop, Lyon:INSA.1985, p123.

Brocard. J 72: Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment, Tome I, Librairie Aristide Quillet, 1972, P 813,815.

Chikouche.M 08: Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires, thèse de magistère à l'université de Msila, 2008.

Chinje Melo.U, Billong.N 04: Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites, African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Series Vol. 5, N°1, Juin 2004, P 92-100.

Djeddou. M et Remini. B 98: Incorporation Environnementale des sédiments issue d'opérations de dragage dans le domaine des matériaux de construction Cas d'étude barrage, 1998.

Domone.P and Luston.J 10 : Construction Materials Their Nature and Behavior ISBN 0-203-92757-5 Master e-book ISBN, 2010, P 92 ; 153.

Dron. R 78 : L'activité pouzzolanique. Bull. liaison Labo. Ponts et Chaussées, vol. 1978, p66-p69.

Dupain. R 00: Granulats, sols, ciments et bétons, 2ème édition, Janvier 2000, Edition Casteilla, P80-81.

Elouazzani.C 05: Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie , thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences et techniques du déchet, Institut national des sciences appliquées de Lyon , 2005, P 18-21,65.

Felekoglu.B, Turkel.S, Baradan.B 07: Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Building and Environment, 42, 2007, p 1795-1802

Festa.J, Dreux.G 98 : Nouveau guide du béton et de ses constituantes, 8ème éditions, Edition Eyrolles , 1998 p 27-33

Foucault.A et Raoult.JF 80 : Dictionnaire de géologie, Editions Masson, Paris, ISBN 2-225-65461-1, ISSN 0338-2672.1980

Gardner.E.M , Gaidis.W.R 91 : Hydration mechanisms I, Materials Science of Concrete, Edited by Skalny,1991, p 95-125.

Jenson. D 00 : Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity, Proceedings of the International RILEM Workshop, Edited by Baroghel - Bouny and P-C. Aïtcin,2000, p 143-153.

Kaid.N 00: Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques, thèse de magistère à l'USTMB D'Oran, 2000.

Kerbouche .A 09 : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers, thèse de magistère à l'ENSET d'oran, 2009.

Kumar.P, Paulo.J.M 06: Concrete (microstructure ; properties and Matérials) Third Edition, 2006, P215.

Laoufi.L 02 : thèse ''contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécanique es bétons à base de ciment pouzzolanique'', ENSET d'Oran, 2002.

Leng.F, Feng.N, Lu.X 00: An experimental study on the properties of resistance todiffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, Cement and Concrete Research, 2000, p 989-992.

Loukili 96: Etude du retrait et du fluage de Bétons à Ultra-Hautes Performances, E.C. Nantes, Thèse de Doctorat, 155 p, Nantes, France, 1996.

Loukil et Coll 01:asic creep of Ultra High strength Concrete - experiments and modeling, Concreep 6, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, Ed. by F.-J. Ulm, Z. P. Bazant and F. H. Wittmann, p 545-550, Boston, USA, 2001.

Marot. F 97: Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques. Thèse de l'Université du Havre, p 330,1997.

Mebrouki.A, Cyr.M, Bouhamou.N, Belas Belaribi.N 06: Valorisation de matériaux locaux, Etude de comportement mécanique de mortiers incorporant une pouzzolane naturelle Algerienne, Article de LMDC université de Mostaganem, INSA/UPS, Toulouse, France, 2006

Neville. A 95: Properties of concrete, Addison Wesley Longman Limited, Forth and final édition, Longman, ISBN 0-582-23070-5, 1995.

Ollivier J.P 81: Contribution à l'étude de l'hydratation d'une pâte de ciment Portland au voisinage des granulats, Thèse de Doctorat, INSA, Toulouse, France, 169p, 1981.

Persson 98: Experimental Studies on Shrinkage of High-Performance Concrete, Cement and Concrete Research, vol. 28, no. 7, p 1023-1036, USA, 1998.

Peter. C. Hewlett 01: Lea's chemistry of cement and concrete ,4 ème édition, ISBN: 0750662565, Publisher: Elsevier Science & Technology Books, P472-480, 2004.

Ramachandran.V.S and Beaudoin.J.J 01: Handbook of analytical techniques in concrete science and technology ISBN 0-8155-1437-9,2001, p 42

Sardon.G 58: Les formations volcaniques tertiaires et quaternaires du Tell oranais, Edition Eyrolles, 1958.

Semcha.A 06 : Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug,2006, P84 ;110

Shetty.M.S 05: Concrete technologie Theory and practice. An ISO 9001 :2000 company,2005 p22

Shneider.G : Boues de curage des cours d'eau , CE, 43,p146-147.

Source : http://www.inra.fr/dpenv/curage.htm

Shnindler.A.K , Folliard.K.J 03: Influence of suplementary cementing materials on heat htdratation of concrete, Advanced in cement and concrete IX Conference,Colorado, P.10-14, 2003.

Tazawa et Miyazawa 95: influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste, Cement and Concrete Research, 25, pp 281-287, 1995.

Tognazzi.C 98: Couplages fissuration-dégradation chimique dans les matériaux cimentaires: caractérisation et modélisation. Thèse de Doctorat, INSA, Toulouse, France, pp220, 1998

Venuat. M 89: La pratique des ciments, mortier et bétons- Tome 1 : caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers, 2 ème édition- Collection moniteur- P 277, 1989.

Yong.J.F 80: Mécanique d'hydratation du ciment Portland, sous thème II1,7ème congrès international de la chimie des ciments, Vol1.Paris 1980.

Zentar et Al 08: Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments". Resources Conservation & Recycling , pp 947 – 954, 2008.

.