

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



MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE: GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX ET DURABILITE DES CONSTRUCTIONS

THEME

**Caractérisation des propriétés thermiques des
liants hydrauliques au jeune âge: ciment et
pouzzolane.**

Présenté Par:

M^{elle} LARBI CHAHT FOUZIA

Soutenance le Mercredi 25 janvier 2012

Devant la commission:

Président:	Mr. BENDANI Karim	M.C. "A"	Univ. Mostaganem
Rapporteur:	Mr. SEMCHA Abdélaziz	M.C. "A"	ENSET-Oran
Examineurs:			
-	Mr. MEBROUKI Abdelkader	M.C. "A"	Univ. Mostaganem
-	Mr. ADDA BEDIA El Abbas	Prof.	Univ. Sidi Bel Abbas

Remerciements

Tout d'abord, on remercie DIEU qui nous a donné la volonté et la force pour effectuer ce travail.

Toute ma gratitude à Mon encadreur Mr. SEMCHA Abdelaziz pour ses orientations, ses conseils et son encouragement.

Et également mes remerciements sont exprimés :

Aux messieurs les membres de jury qui ont accepté de juger mon travail.

D'autre part je dresse mes plus vifs remerciements à tous les enseignants de La faculté de « GENIE CIVIL ».

Je souhaite ensuite remercier tous les membres du laboratoire LTPO et spécialement : DANNI ; WASSILA ; ABDERAHMAN ; FATAH ; ainsi que les membres de laboratoire BENTINI et spécialement : SALAH ; ISSAM ; RACHID ; SALIM ; RENZO.

Je souhaite aussi à exprimer ma gratitude à tous les membres de laboratoire de la cimenterie de zahana et spécialement : Mon frère MOHAMED ; Mr FLIO ainsi que le laboratoire d'analyse chimique (CETIM).

Mais une personnalité ne se construit pas que sur la durée d'une thèse... je tiens alors à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont fait de moi ce que je suis. Mercis à vous, tous mes amis, rencontrés au lycée ; à l'université ou dans d'autre occasion, vous avez su être à mes côtés lorsque j'ai traversé des épreuves. Votre présence ou vos pensées le jour de ma soutenance de ma thèse sont, pour moi, le témoin de quelque chose de fort qui s'appelle de l'amitié.

A tous ceux qui m'ont aidés pour la réalisation de ce mémoire.

LARBI CHAHT FOUZIA

Sommaire

Remerciement	1
Résumé	2
Abstract	3
ملخص	4
Introduction général	5

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux cimentaires.

1	Histoire de la fabrication du ciment Portland	7
2	Définition et généralités	8
2.1	Fabrication du ciment	9
2.2	Les différents types de liant hydraulique	12
	CEM I : ciment Portland	12
	CEM II : ciment Portland composé	15
2.3	Constituants principaux des ciments	16
	Le laitier de haut fourneau (S)	16
	Les fumées de silice (D)	17
	Les cendres volantes (V ou W)	18
	Schistes calcinés (T)	19
	Calcaires (L)	19
	La pouzzolane (Z)	19
2.4	Comportement d'un ciment avec ajout minéral	19
3	Hydratation du ciment	20
3.1	Réactions d'hydratation	20
3.2	Chaleur d'hydratation	23
3.3	Facteurs influents sur la cinétique d'hydratation	26
	La classe du ciment	26
	Les sels	26
	La température	27
	Les adjuvants accélérateurs	27
	Le malaxage	27
3.4	Représentation du mécanisme de prise et du durcissement	28
	a) La prise du ciment	28
	Phase dormante	28
	Début et fin de prise	28
	Durcissement	29
	b) Fausse prise	30

Chapitre II : Etude bibliographique sur la pouzzolane.

1	Introduction	31
2	Les dragages en Algérie	32
3	Définition de la vase	33
4	La Calcination	33
5	La pouzzolane (Z)	34
5.1	Historique de l'utilisation de pouzzolane naturelle dans le monde	34

5.2	Définition de la Pouzzolane	36
5.3	Caractéristique de la Pouzzolane	37
5.4	La réaction Pouzzolanique	38
	Description de la réaction	38
	Occurrence des réactions	39
5.5	Définition de l'activité Pouzzolanique	40
5.6	Facteurs affectant à la réaction Pouzzolanique	41
5.7	Types de pouzzolane	41
	Pouzzolane naturelle	41
	Pouzzolane artificielle	42
5.8	Comportement de La pouzzolane	42
5.9	Effet Pouzzolanique	43
5.10	Valorisation de la vase dans les ciments pouzzolaniques	43
	Intérêt du point de vue économique	44
	Intérêt du point de vue technique	44

Chapitre III : Etude bibliographique sur les propriétés thermiques.

1	Introduction	45
2	C'est quoi le jeune âge	46
3	C'est quoi la chaleur d'hydratation	46
3.1	Chaleur d'hydratation du ciment	46
3.2	Effet de la chaleur d'hydratation	52
3.3	La vitesse d'hydratation	52
3.4	Degré d'hydratation des liants	53
4	Propriétés thermiques	54
5	Analyses thermogravimétriques (ATG)	55

Chapitre IV: Matériaux utilisés et méthodes d'essai.

1	Introduction	56
2	Matériaux utilisés	56
1	Le ciment	56
1.1	Caractérisation Physico-chimiques du ciment	57
1.2	Composition minéralogique	59
1.3	Formules de bogue	60
2	Le sable	60
3	L'eau de gâchage	61
4	Pouzzolane naturelle	62
	Composition chimique	63
	Caractéristique physiques	63
5	La vase	64
	Caractéristique de la vase avant calcination	64
	Caractéristique de la vase après calcination	64
6	Confection des éprouvettes de mortiers	65
	Descriptions des mélanges	65
	L'ouvrabilité	67
	Résistances mécaniques	70

	La résistance à la traction	71
	La résistance à la compression	75
3	Détermination de la chaleur d'hydratation	80
	Mode opératoire	80
	Fabrication du mortier normal	81
	Mesure de la chaleur d'hydratation	81
	Calcul de la chaleur d'hydratation	81
	Conclusion	87
	Conclusion générale	88
	Perspectives	89

Liste des Figures

Figure		Page
1	Figure 1.1 Description des étapes de fabrication du ciment Portland	10
2	Figure 1.2 Processus de fabrication du ciment	11
3	Figure 1.3 Cristaux anhydres du clinker	13
4	Figure 1.4 Comparaison entre les méthodes de fabrication de ciment	14
5	Figure 1.5 Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope	16
6	Figure 1.6 Fumée de silice vu au microscope	17
7	Figure 1.7 Cendre volante	18
8	Figure 1.8 Cendre volante	18
9	Figure 1.9 Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment après le contact	24
10	Figure 1.10 Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment	25
11	Figure 1.11 Hydratation du grain de ciment	29
12	Figure 1.12 Les phases de l'hydratation	30
13	Figure 2.1 barrage du Fergoug	33
14	Figure 2.2 Température du four en fonction du temps	34
15	Figure 3.1 Courbe calorimétrique relevée pendant l'hydratation d'un ciment	47
16	Figure 3.2 Effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment	49
17	Figure 3.3 Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche cellulaire	55
18	Figure 4.1 Pénétration d'une sonde Ø10 mm	57
19	Figure 4.2 Pénétration d'une aiguille Ø 1.13mm	57
20	Figure 4.3 Composition granulométrique du sable de référence CEN	61
21	Figure 4.4 Malaxeur normalisé	66
22	Figure 4.5 Table à choque	67
23	Figure 4.6 Table à secousses	68
24	Figure 4.7 Principe de fonctionnement du maniabilimètre	69
25	Figure 4.8 éprouvette du mortier	70

26	Figure 4.9	<i>Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion</i>	71
27	Figure 4.10	Machine de la traction par flexion	72
28	Figure 4.11	Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant de la pouzzolane	73
29	Figure 4.12	Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant de la vase	74
30	Figure 4.13	Evolution de la résistance la résistance mécanique des différents mortiers avec les ajouts (P et V) en fonction de l'âge	75
31	Figure 4.14	<i>Dispositif de rupture en compression</i>	76
32	Figure 4.15	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la pouzzolane	77
33	Figure 4.16	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la vase	78
34	Figure 4.17	Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers avec les ajouts (P et V) en fonction de l'âge	79
35	Figure 4.18	Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers avec les ajouts (P et V) en fonction de l'âge	80
36	Figure 4.19	évaluation de la chaleur d'hydratation en fonction du temps	84
37	Figure 4.20	évaluation de la chaleur d'hydratation en fonction du temps	86
38	Figure 4.21	évaluation de la chaleur d'hydratation en fonction du temps	86

Liste des tableaux

	Tableau		Page
1	Tableau 1.1	Exemple de composition chimique d'un clinker	13
2	Tableau 1.2	Les constituants et les additions du ciment	15
3	Tableau 1.3	Masses molaires, masses volumiques des réactifs et des produits des réactions d'hydratation (à 20° C)	23
4	Tableau 1.4	La chaleur d'hydratation	26
5	Tableau 3.1	Chaleur d'hydratation des principaux minéraux du ciment	50
6	Tableau 3.2	Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment	50
7	Tableau 3.3	Chaleur d'hydratation de principales constituantes du ciment et leur comportement	51
8	Tableau 3.4	Chaleur d'hydratation selon Bogue et Taylor	51
9	Tableau 4.1	Conduite du malaxage selon la norme EN196-3	58
10	Tableau 4.2	analyse Physico-chimiques du ciment CPA	59
11	Tableau 4.3	Composition minéralogique du ciment CPA selon Bogue	60
12	Tableau 4.4	Analyse chimique de l'eau de gâchage	62
13	Tableau 4.5	Composition chimique du pouzzolane	63
14	Tableau 4.6	Caractéristique physiques de la pouzzolane	63
15	Tableau 4.7	Caractérisation chimique de la vase avant calcination	64
16	Tableau 4.8	Caractérisation chimique de la vase après calcination	64
17	Tableau 4.9	Caractéristique physiques de la vase	65
18	Tableau 4.10	Composition des mélanges	66

19	Tableau 4.11	Opérations de malaxage du mortier normal	66
20	Tableau 4.12	Composition des différents mortiers	67
21	Tableau 4.13	Résultats de la maniabilité des différents mortiers confectionnés	69
22	Tableau 4.14	Résultats de la résistance de la traction par flexion	72
23	Tableau 4.15	Résultat de la résistance à la compression des mortiers	76
24	Tableau 4.16	Evaluation de la chaleur d'hydratation du ciment CPA en fonction de l'âge	83
25	Tableau 4.17	évaluation de la chaleur d'hydratation du mortier contenant de la pouzzolane (P20)	85

Résumé

Les matrices cimentaires confectionnées avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études.

Toutefois aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des performances des mortiers, car le mélange des différents matériaux n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre différents constituants. Par ailleurs, le mélange de matériaux compatibles ne conduit pas toujours aux mêmes résultats ; des interactions (ou interactivités) éventuelles peuvent

exister entre les différents types de matériaux.

Ces interactions peuvent se manifester par des synergismes ou des antagonismes entre les constituants, et sont difficiles à détecter. Ainsi, peu d'études ont été effectuées pour mettre en évidence les interactions éventuelles entre les différents composants des mélanges cimentaires. Les chercheurs reconnaissent le besoin d'outils complexes et performants pour mener des études dans ce domaine.

L'objectif de cette étude était d'examiner l'utilisation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et la pouzzolane de synthèse produit à partir de la vase du barrage du Fergoug comme substitution partiel au ciment portland dans le mortier, et cela pour évaluer leurs effets sur les résistances mécaniques au jeune âge, et ça pour valoriser ces déchets dans l'industrie cimentaire.

Les principaux résultats ont révélé que La résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la pouzzolane ou la vase diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout que se soit pouzzolane ou vase et cela pour tous les âges.

L'effet de la pouzzolane donne lieu à une consommation de la chaux, alors que l'hydratation constitue une réaction donnant lieu à une production de la chaux.

La capacité des matériaux Pouzzolaniques à diminuer la chaleur d'hydratation est largement (grâce à sa propriété de fixation de la chaux) exploitée dans les constructions en grande masse, où les risques de fissuration se présentent.

Mot clés : mortier, ciment, pouzzolane naturelle, la vase, jeune âge, propriété thermique, résistance mécanique.

Abstract

Cementitious matrices made up with mineral addition were the subject of many studies. However, no rule has yet been found to quantify the effects of such additions, against the performance of mortars, as the mixing of different materials is not a simple operation, because of incompatibilities that may exist between individual components. In addition, the mixture of materials compatible does not always lead to the same results; interactions (or interactivity) are possible exist between different types of materials.

These interactions can occur through synergies or antagonisms among the settlers, and are difficult to detect. Thus, few studies have been conducted to highlight the potential interactions between different components of the cementitious mixtures. Researchers recognize the need for complex and powerful tools for studies in this area.

The objective of this study was to examine the use of natural pozzolan of Beni-Saf and synthetic pozzolana produced from the mud of the dam as fraction Fergoug substitution for Portland cement in the mortar, and for assessing their effects on mechanical strength at early age, and that to recover these wastes in cement industry.

The main results showed that the tensile strength in bending of mortars prepared with different rates of substitution of pozzolan or mud decreases with increasing the percentage of pozzolan addition whatsoever or vase, and this for all ages.

The effect of pozzolan results in consumption of lime, while hydration is a reaction resulting in production of lime.

The ability of pozzolanic materials to reduce heat of hydration is largely (thanks to that property setting of lime) used in the constructions in large mass, or the risk of cracking occurs.

Key words: the mortar, the cement, natural pozzolan, the mud, early age, thermal property, mechanical strength.

ملخص

كانت ولا تزال مصفوفات الاسمنت المتكونة من إضافات معدنية موضوعا لدراسات عديدة ومع ذلك، لم يتم بعد العثور على قاعدة لتقدير الآثار المترتبة على هذه الإضافات.

كما أن خلط مواد مختلفة ليست عملية بسيطة، وذلك بسبب عدم التوافق الذي قد يكون موجودا بين مختلف المكونات بالإضافة إلى ذلك فإن مزيج المواد غير المتوافقة لا يؤدي دائما إلى نفس النتائج؛ نظرا للتفاعلات الممكنة الموجودة بين مختلف المواد، والتي يصعب اكتشافها. وبالتالي ، فقد أجريت دراسات قليلة لتسليط الضوء على التفاعلات المحتملة بين مختلف مكونات الخلطات الإسمنتية والملاطات. وكان الهدف من هذه الدراسة البحث عن استخدام البوزولان الطبيعية بني صاف والبوزولان الاصطناعية المنتجة من طين سد الفرقوق باستبدال جزئي لاسمنت البورتلاندي في الملاط ، وتقييم آثارها على القوة الميكانيكية في الأجل القصير ، وذلك لاستعادة هذه النفايات في صناعة الاسمنت. وأظهرت النتائج الرئيسية أن المقاومة في كلتا الملاطات تتزايد بإزدياد عمر الملاط وذلك مهما كانت نسبة البوزولان الطبيعي أو الاصطناعي المضافة. كما تمت دراسة تأثير البوزولان الطبيعي في التأثير على الخصائص الحرارية للملاط.

كلمات البحث : الملاط، الاسمنت البورتلاندي، البوزولان الطبيعية، البوزولان الاصطناعية ، الطين ، الأجل القصير ، الخصائص الحرارية ، المقاومة.

Introduction générale

Grâce à leurs propriétés mécaniques et aux faibles coûts de fabrication par rapport à d'autres matériaux de construction, les matériaux cimentaires sont les plus utilisés dans le domaine du génie civil. À la frontière entre plusieurs domaines – la chimie, la physique et la mécanique – l'étude des phénomènes qui ont lieu dans les matériaux cimentaires a soulevé une multitude de questions et a généré plusieurs controverses.

Les matériaux à base de ciment sont des matériaux « vivants », avec des périodes bien définies dans leur vie. Le jeune âge commence avec le contact entre l'eau et le ciment qui provoque un enchaînement de réactions chimiques impliquant les phases anhydres du ciment. Le matériau passe d'un état fluide à un état solide, la microstructure commence à se définir, et le matériau gagne en résistance mécanique et en rigidité.

Les matrices cimentaires confectionnées avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études.

Il a été estimé que la production d'une tonne de ciment portland entraîne la libération d'une tonne de CO_2 dans l'atmosphère. Le CO_2 est connu pour être un gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement de la planète, et seule l'industrie du ciment génère environ 7% de celui-ci.

Ces points et ces chiffres semblent indiquer que l'industrie du béton est devenue une victime de son propre succès et est donc confronté à d'énormes défis. Le béton est en soi un matériau respectueux de l'environnement. Les défis sont donc essentiellement à réduire la production du ciment portland et ses répercussions sur l'environnement. En d'autres termes, il faut utiliser des ajouts naturels tel que la pouzzolane naturelle ou des sous produits de différentes industries comme les laitiers, les cendres volantes ou des déchets ; en remplacement du ciment.

Toutefois aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des performances des mortiers, car le mélange des différents matériaux n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre différents constituants.

Ainsi, peu d'études ont été effectuées pour mettre en évidence les interactions éventuelles entre les différents composants des mélanges cimentaires. Les chercheurs reconnaissent le besoin d'outils complexes et performants pour mener des études dans ce domaine.

Le recours aux ajouts naturels, aux déchets et aux sous produits industriels est lié aussi à la diminution des ressources mondiale en matière première et à l'augmentation de la consommation de la matière première, et enfin à la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement.

L'étude des matériaux cimentaires permet d'aboutir vers une meilleure compréhension des phénomènes qui agissent au sein de leur microstructure fortement hétérogène, et d'un point de vue pratique, c'est un moyen d'assister le matériau pendant ses premiers jours et d'assurer une meilleure durabilité, donc une plus importante durée de vie du matériau durci.

Effectivement, connaître le développement de la microstructure du matériau (de son squelette solide et de sa porosité), de ses propriétés thermique et mécaniques, suivre l'ampleur des déformations qu'il subit à jeune âge et estimer sa capacité de fluer pour relâcher les contraintes développées, nous permet de connaître le risque de fissuration auquel il sera confronté au jeune âge.

Chapitre 01

Etude bibliographique sur les matériaux cimentaire

1). Histoire de la fabrication du ciment Portland :

Le ciment Portland est un ciment essentiel de silicate de calcium, qui est produit par cuisson à

fusion partielle, à une température d'environ 1500 ° C, mélange de calcaire ou de la craie (carbonate de calcium) et une quantité appropriée d'argile ou de schiste. La composition est généralement affiné par l'ajout de sable et / ou oxyde de fer.

Le premier ciment au silicate de calcium ont été produites par les Grecs et les Romains, qui ont découvert que les cendres volcaniques (volantes), finement broyées et mélangées avec de la chaux et de l'eau, produit un mortier qui durcit et résiste aux intempéries.

Cette réaction est connue sous le nom réaction pouzzolanique qui est à l'origine des performances mécaniques des bétons modernes composés par des matériaux comme les cendres volantes, la fumée de silice ou le métakaolin comme ajouts minéraux. Dans le milieu du XVIIIe siècle John Smeaton a découvert que certaines chaux qui avait des propriétés hydrauliques, car ils contenaient des silicates et des aluminates réactives, qui pourraient réagir avec l'eau pour donner des hydrates durables qui ont résisté à l'action de l'eau. Smeaton a utilisé ce matériau dans le mortier pour construire le phare Eddystone en 1759 (Angleterre).

Le terme «Ciment Portland » a été appliqué par Joseph Aspdin dans son brevet britannique

N ° 5022 (1824), qui décrit un procédé de fabrication de pierres artificielles en mélangeant de la chaux avec de l'argile sous la forme d'une suspension et d'une calcination (chauffage pour chasser le dioxyde de carbone et l'eau).

Le terme «Portland» a été utilisé en raison de la similitude des produit durci à celle de pierre de Portland de Dorset et aussi parce que cette pierre a eu une excellente réputation de performances.

Joseph Aspdin n'était pas le premier à produire du ciment à base de silicate de calcium, mais son brevet lui a donné la priorité pour l'utilisation du terme «ciment Portland».

D'autres travailleurs ont été actifs en même temps ou plus tôt, et plus particulièrement Louis Vicat en France. Blezard (1998) [01] donne une aperçu exhaustif de l'histoire du développement du ciment calcaire (à base de chaux).

Les ciments fabriqués dans la première moitié du XIXe siècle n'ont pas eue la même composition que les ciments Portland moderne car la température n'a pas assez haute pour obtenir le principal minéral des constituant des ciments modernes : silicate tricalcique (C3S).

Le seul silicate bicalcique obtenu est le moins réactif des silicates (C2S).

C'était l'introduction du four rotatif à la fin du XIXe siècle qui permis l'obtention d'un produit homogène, qui avait permis une température assez haute, suffisante pour assurer la formation de C3S.

Au cours du XXe siècle La nature du produit a relativement peu changé en termes de chimie générale et composition minérale, mais il ya eu des progrès considérables dans la technologie de production résultant à améliorer l'efficacité énergétique, le contrôle de la qualité et la réduction des impacts sur l'environnement.

Le contrôle de la composition du clinker a progressé, les proportions sont arrivées par essais et erreurs dans la fin du XIXe siècle à un contrôle précis à l'aide rapide X-ray techniques de fluorescence.

L'amélioration des méthodes de fabrication est continue et le contrôle de la qualité conjuguée à des pressions concurrentielles du marché n'ont donné lieu à une augmentation de la résistance à 28 jours donné par un ciment Portland européen typique à 28 jours depuis la fin du XIXe siècle (Blezard, 1998).[02]

II). Définition et généralités :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment gâché et mélangé avec des granulats et de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve une ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance donnés et aussi présenter une stabilité de volume à longue échéance.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation de silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates. La somme des proportions d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse, dans les ciments [].

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différentes matières, mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment est obtenu par un procédé continu de production en masse et, en particulier, par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation.[03]

II-1) Fabrication du ciment :

1. Entreposage des matières premières

2. Broyage
3. Homogénéisation
4. Préchauffage et pré-calcination
5. Four rotatif
6. Entreposage du clinker
7. Additifs (gypse, cendres volantes, etc...)
8. Mouture du ciment
9. Entreposage en vrac et chargement. [04]

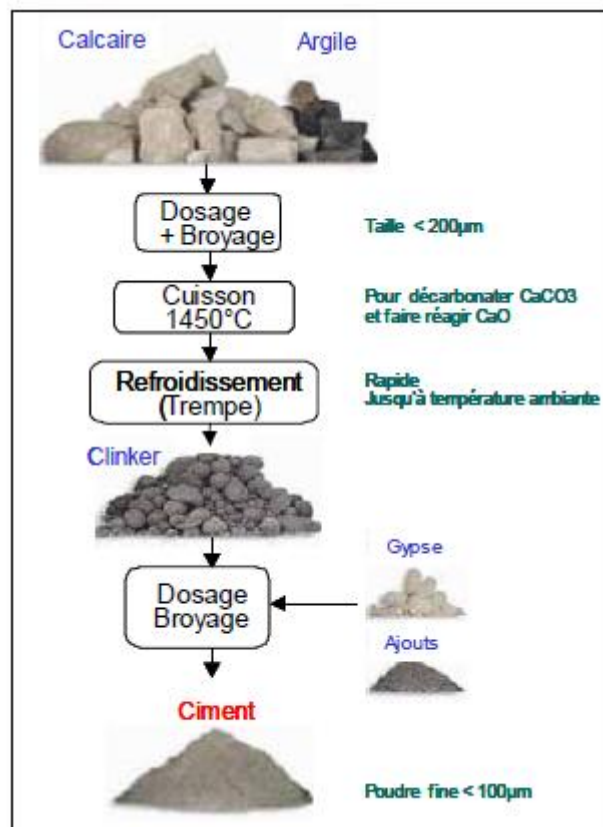


Figure. 1.1. Description des étapes de fabrication du ciment Portland. [05]

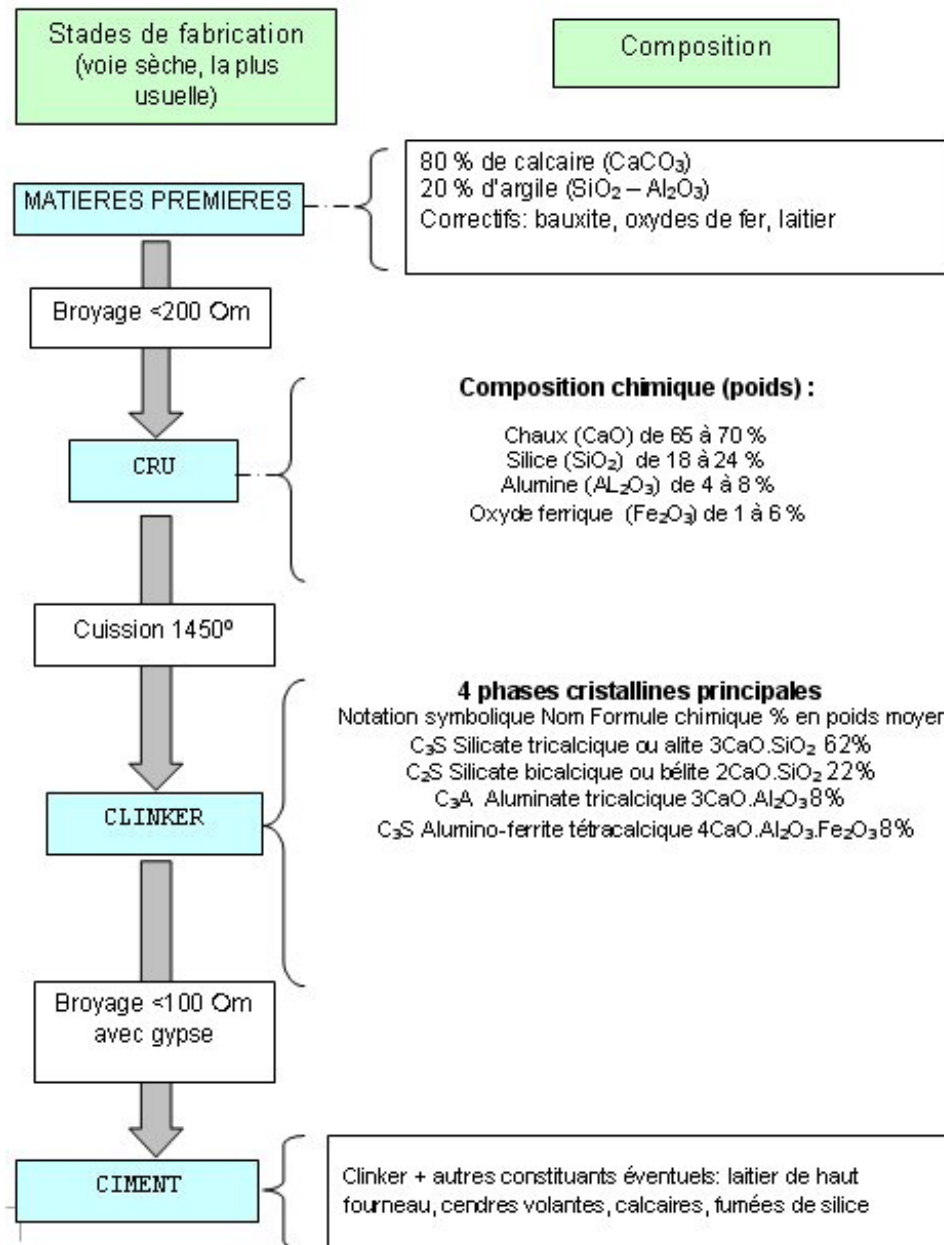


Figure. 1.2. Processus de fabrication du ciment. [06]

II-2) Les différents types de liant hydraulique :

Un liant hydraulique est une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de

l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il s'agit d'un mélange d'un ou plusieurs constituants qui présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- des propriétés hydrauliques, ils forment par réaction avec de l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
- des propriétés pouzzolaniques, ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables ;
- des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...)

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition :

- CEM I : ciment Portland ;
- CEM II : ciment Portland composé ;
- CEM III : ciment de haut-fourneau ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique ;
- CEM V : ciment composé.[07]

II-2.1) Le ciment portland artificiel (CEM I) :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des 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.[08]

- **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 1.1) [09]

Oxydes	Notation	Pourcentage	Marge d'erreur
Perte au feu	-	1,08	$\pm 0,05$
SiO ₂	S	21,1	$\pm 0,1$
Al ₂ O ₃	A	5,11	$\pm 0,05$
Fe ₂ O ₃	F	3,31	$\pm 0,05$
TiO ₂	-	0,21	$\pm 0,01$
MnO	-	0,04	$\pm 0,01$
CaO	C	65,5	$\pm 0,2$
MgO	M	1,31	$\pm 0,03$
SO ₃	$\tilde{S}$	0,93	$\pm 0,02$
K ₂ O	K	1,02	$\pm 0,02$
Na ₂ O	N	0,21	$\pm 0,02$
P ₂ O ₅	-	0,04	$\pm 0,01$
SrO	-	0,08	$\pm 0,01$

Tableau 1.1 : Exemple de composition chimique d'un clinker [09].

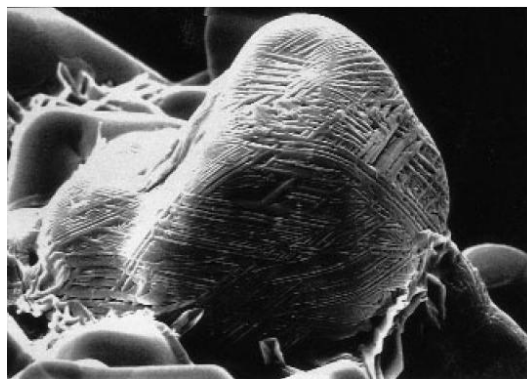


Figure. 1.3 : Cristaux anhydres du clinker. [10]

- **La préparation du cru :**

La plupart du temps, le cimentier doit mélanger deux ou plusieurs matières premières pour obtenir après cuisson un produit ayant les caractéristiques du clinker Portland naturel, c'est à-dire le plus souvent du calcaire, de l'argile ou du schiste et d'autres matières pour obtenir du clinker, on peut distinguer : [11]

* *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. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herse.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le

cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d’apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l’entrée d’un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d’un cylindre d’acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres.[12]

* *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.

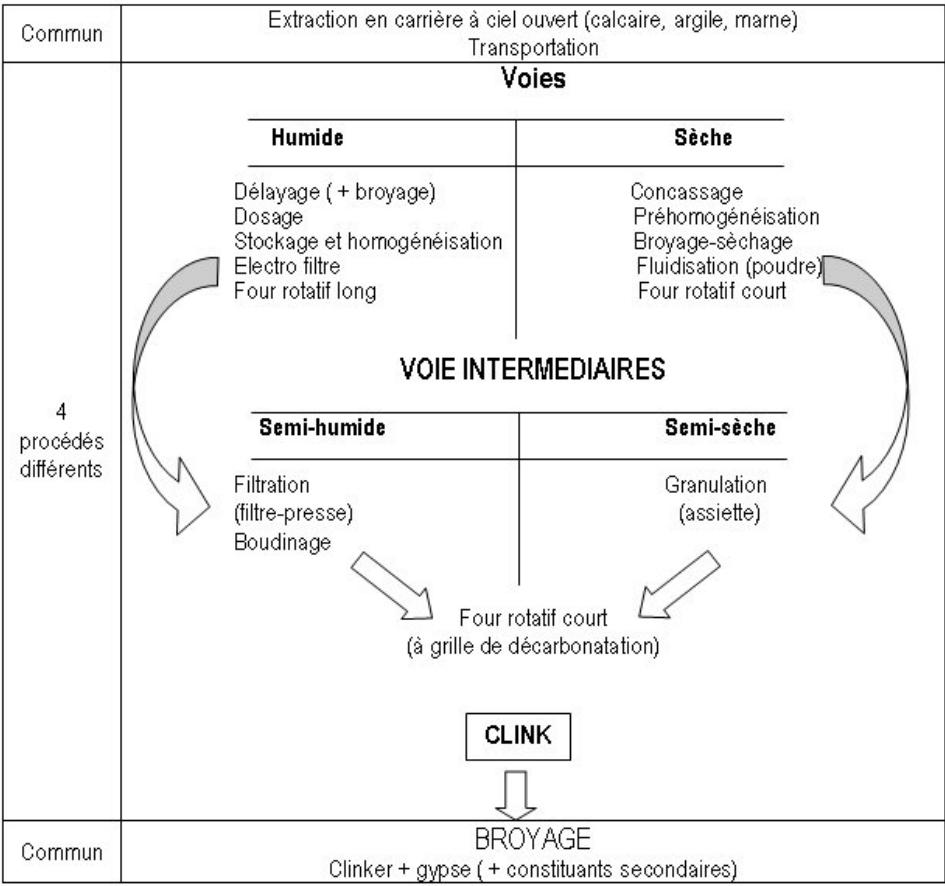


Figure. 1.4. Comparaison entre les méthodes de fabrication de ciment. [3]

II-2.2) Le ciment portland composé (CEM II) :

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On à, par convention :

(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 1.2)

- 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).

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

Tableau 1.2- Les constituants et les additions du ciment [11].

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.[11]

II-3) 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.

a) Le laitier de haut fourneau (S) :

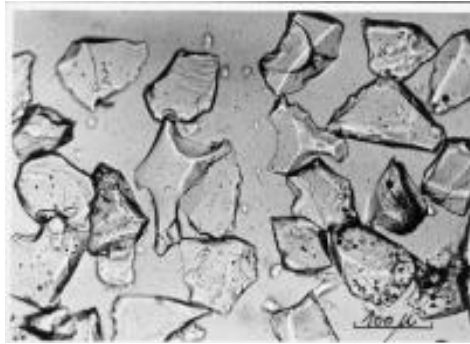


Figure. 1.5: Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope [13].

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer plus pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de

pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 μm pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés.

En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du Ca(OH)_2 , fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques. [11]

Pour faire prise, le laitier doit subir une activation calcique, sulfatique ou sulfo-calcique, ou par des alcalins. Deux exemples de réaction d'hydratation et d'activation du laitier sont donnés ci après :

Chaux (activation)

Laitier granulé + eau $\Longrightarrow$ C-S-H, C₄AH₁₃.

Ciment portland (activation)

Laitier granulé + eau $\Longrightarrow$ C-S-H, Ettringite $[3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}]$;
Monosulfoaluminate de calcium hydraté $[\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$; Hydrogrenat
 $[\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$; Hydrotalcite $[\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ [14]

b) Les fumées de silice (D) :

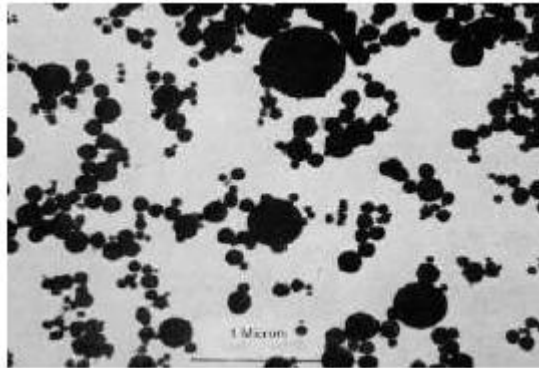


Figure. 1.6: Fumée de silice vu au microscope [11].

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium . Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz

très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 μm . Leur surface spécifique est de 20 m²/g à 25 m²/g.

La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95%.

Les fumées de silice 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. [15]

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'ajout et de stabilisateur. Qu'on l'appelle microsilica, fumée de silice condensée ou plus régulièrement fumée de silice, tous ces termes représentent la même pouzzolane. [11]

Si la proportion de fumées de silice dans le ciment excède 3 % en masse, seules les fumées de silice satisfaisantes aux spécifications suivantes doivent être utilisées:

- silice amorphe (SiO_2) ≥ 85 % en masse ;
- perte au feu ≤ 4 % en masse ;
- aire massique (non traitée) $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$. [03]

c) Les cendres volantes (V ou W) :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion en centrale thermique des combustibles minéraux solides (houille, lignite...) ; elles rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 20%) ; on les ajoute au moment du broyage du clinker [13].

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et physiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé.

Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (ASTM C 618-94a). [16]

On distingue :

1- Classe F : contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux

2- classe C : contenant entre 15 % et 35% de CaO produit de la combustion de la lignite.[04]

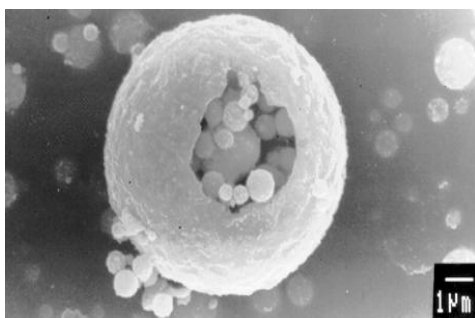
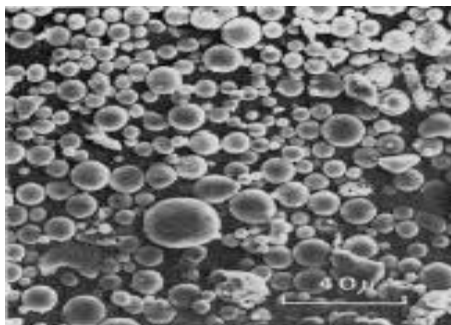


Figure. 1.7. Cendre volante [13].

Figure. 1.8. Cendre volante. [17]

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1 μm à 100 μm ($50 \% < 20 \mu\text{m}$). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.

d) Schistes calcinés (T) :

Ces produits, obtenus à des température de l'ordre de 800°C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés.[15]

e) Calcaires (L) :

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du ciment, les calcaires doivent être composés de 75% au moins de CaCO_3 [18]. Et dont la teneur en TOC (Total Organic Carbon) est limitée :

Si ce TOC est $< 0.20 \%$ désignation abrégée : LL

Si ce TOC est $< 0.50 \%$ désignation abrégée : L

Un béton confectionné avec un ciment contenant des proportions élevées en calcaire à haute

teneur en TOC risque de ne pas accuser une haute résistance au gel-dégel [11].

f) La pouzzolane (Z) :

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [04]

II-4) Comportement d'un ciment avec ajout minéral :

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout.

- ✓ La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- ✓ Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- ✓ Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par

transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif.

Les substances pouzzolaniques contiennent encore moins, voire pas d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif.

Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton.

La fumée de silice représente dans ce groupe l'activité la plus importante, parce qu'elle possède la plus faible part cristalline et la plus grande surface spécifique. Les substances inertes ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins.

L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton.

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également.

En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance.

Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique des ajouts. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons.

III) Hydratation du ciment :

III-1) Réactions d'hydratation :

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

Les interactions avec l'eau des différents minéraux composant le clinker se produisent au

même temps et, en se superposant. Les nouvelles formations obtenues peuvent à leurs

tours interagir entre elles, ainsi qu'avec les minéraux de départ du clinker en donnant de nouveaux

composés . Tout cela crée des difficultés pour l'étude de durcissement du ciment portland .

Le C₃S s'hydrate rapidement et est largement responsable de la prise et du durcissement de la pâte; le C₃S assure la résistance initiale. Le C₂S s'hydrate lentement, il est responsable du gain en résistance à long terme (une semaine et plus). Le C₃A s'hydrate très rapidement, et libère beaucoup de chaleur dans les premiers jours, et contribue légèrement à la résistance initiale.

Le C₄AF s'hydrate lentement et contribue peu à la résistance mécanique. Le sulfate de calcium est ajouté au broyage pour contrôler l'hydratation du C₃A par la formation de composés moins réactifs (ettringite, sulfoaluminates). Sans le gypse, le ciment contenant du C₃A fait prise trop rapidement.

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

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

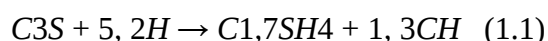
qui représentent 90% ou plus de la masse du ciment : le C₃S, le C₂S, le C₃A et le C₄AF.

Le silicate tricalcique (C₃S) est la phase la plus abondante du ciment. Elle représente entre 50 et 70% de la masse du ciment [1]. 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



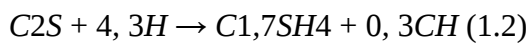
Les deux produits de la réaction chimique sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de l'hydroxyde de calcium (CH). Les C-S-H forment la phase la plus abondante de la pâte de ciment hydraté. Les C-S-H sont en fait une famille de produits mal cristallisés et ce sont eux qui contribuent à la résistance 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 pâte.

La deuxième phase du ciment anhydre est appelé bélite qui est en fait du silicate bicalcique (C2S). Elle constitue entre 15 et 30% de la composition du ciment . 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

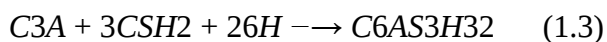


L'aluminate tricalcique (C3A) est la troisième phase du ciment. Elle constitue entre 5 et 10% de la composition du ciment . Lors de la réaction chimique, le C3A libère une grande quantité de chaleur durant les premières minutes de l'hydratation et il contribue légèrement à l'accroissement de la résistance 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 C3A réagit avec l'eau et le gypse pour former de l'ettringite (AFt).

Une fois l'ettringite formée, celle-ci réagit avec le C3A toujours disponible pour former des monosulfoaluminates de calcium (ou AFm). Les deux équations chimiques sont les suivantes :

Etape 1 :

aluminate tricalcique + gypse + eau → ettringite



Etape 2 :

aluminate tricalcique + ettringite + eau → monosulfoaluminate de calcium



La dernière phase principale du ciment est l'aluminoferrite tétracalcique (C4AF).

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 C4AF 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 C4AF. La réaction chimique est la suivante :

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



Il est indiqué pour, que les réactions d'hydratation se poursuivent, une certaine quantité d'eau doit être adsorbée par les hydrates, sans que celle-ci soit chimiquement liée. Cette eau adsorbée sert majoritairement à remplir la porosité des CSH elle est absolument indispensable à leur formation.

Constituants	M _i (g.mol ⁻¹)	ρ _i (g.cm ⁻³)	Constituants	M _i (g.mol ⁻¹)	ρ _i (g.cm ⁻³)
C ₃ S	236,33	3,13	Ca(OH) ₂	74,08	2,23
C ₂ S	176,25	3,28	C ₃ S ₂ H ₃	342,40	2,63
C ₃ A	270,20	3,03	C ₆ AŠ ₃ H ₃₂	1338,69	1,78
C ₄ AF	485,97	3,73	C ₄ AŠH ₁₂	650,36	2,02
CŠH ₂	200,26	2,32	C ₃ AH ₆	378,19	2,52

Tableau 1.3- Masses molaires, masses volumiques des réactifs et des produits des réactions d'hydratation (à 20° C) [20].

III-2) Chaleur d'hydratation :

La réaction chimique entre le ciment et l'eau est très exothermique, c'est-à-dire qu'elle dégage beaucoup de chaleur. Les deux phases minéralogiques principalement responsables de la quantité de chaleur dégagée sont le C3A et le C3S. La finesse, la teneur en ciment et la température de cure sont également d'autres facteurs qui peuvent influencer 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 des 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 apparaître en surface et endommager sérieusement l'ouvrage.

C'est donc un problème avec lequel les ingénieurs de la pratique doivent composer.

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 1.9 présente les cinq étapes ainsi qu'un exemple de courbe du dégagement de chaleur en fonction du temps écoulé depuis le contact E/C [32]. Tout dépendamment de la phase minéralogique, le dégagement de chaleur peut changer d'intensité.

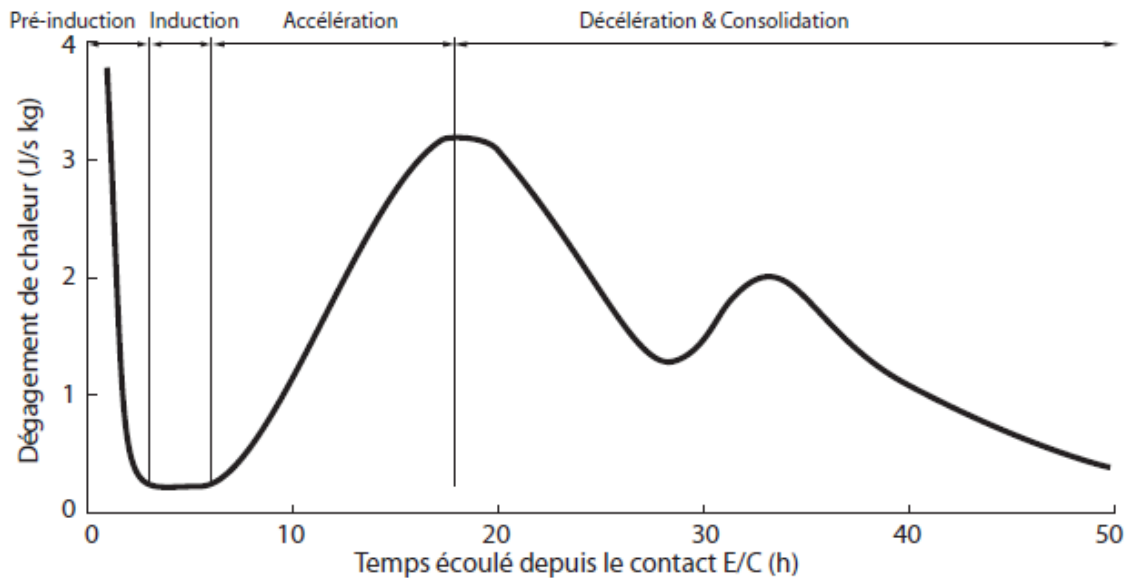


Figure. 1.9: Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment après le contact E/C (h).

La première étape de pré-induction correspond à la dissolution du C3S et du C3A 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 entraîne la phase d'induction.

Sur la Figure 9.1, 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 où 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.

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. Étant 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. [21]

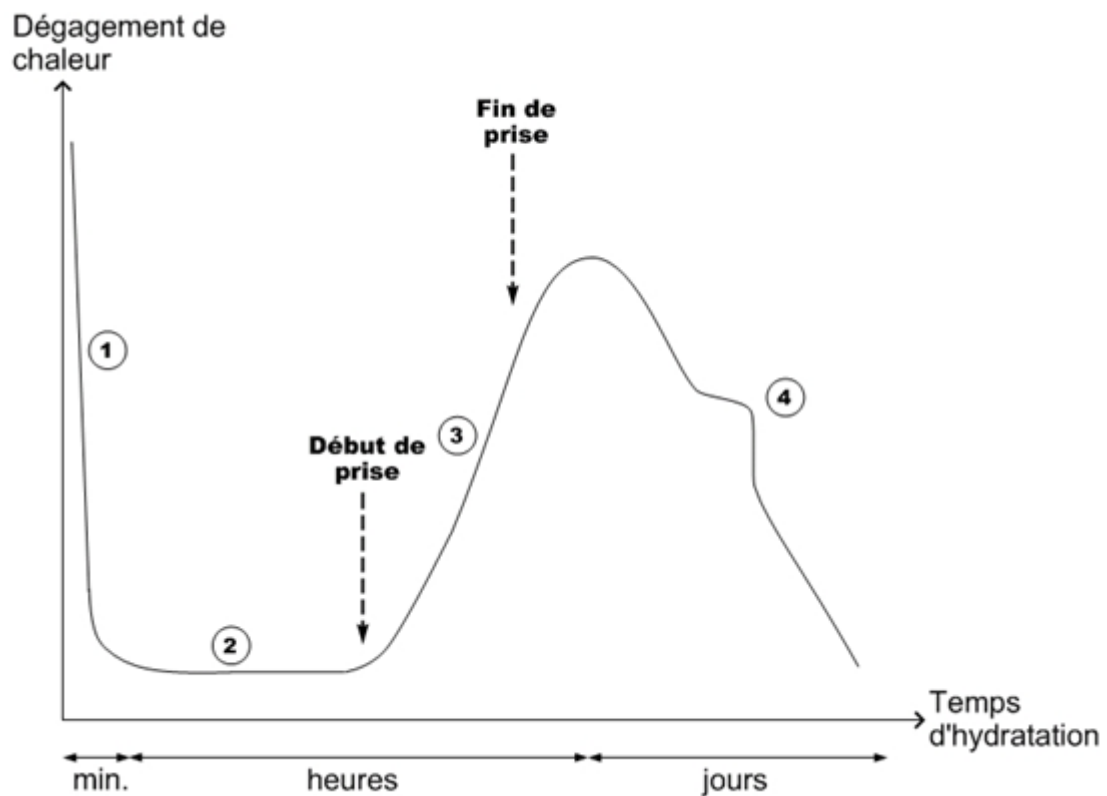


Figure. 1.10. Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment. [04]

Constituants du C.P	Chaleur d'hydratation [J/gr]		
	7 jours	28 jours	6 mois
C3S	460	502	502
C2S	84	189	251
C3A	773	857	865
C4AF	168	209	293

Tableau 1.4. La chaleur d'hydratation. [04]

III-3) Facteurs influents sur la cinétique d'hydratation :

a) La classe du ciment :

Elle caractérise la résistance à la compression du ciment, mesurée à 28 jours.

Elle dépend de la rapidité d'hydratation et de la structuration de la pâte du ciment.

Elle fait intervenir la composition minéralogique du ciment, la finesse de broyage et le gypsage.

Un CPA broyé à une SSB de 5000, offre une plus grande résistance à la compression qu'un CPA identique broyé à 3500 (respectivement 50 et 40 MPa) à 28 jours.

Son hydratation est en fait, plus rapide parce qu'elle présente une plus grande surface libre à l'action de l'eau.

Les grains $> 30 \mu$ ne s'hydratent jamais complètement.

b) Les sels :

Les sels contenus dans l'eau de gâchage et l'eau de conservation, en réagissant avec les différents constituants du ciment peuvent améliorer ou altérer ses qualités.

c) La température :

Dans l'hydratation du ciment portland, la température joue un rôle à la fois thermodynamique et cinétique.

- ✓ Thermodynamique par ce qu'elle change la nature et la stabilité des hydrates.
- ✓ Cinétique par ce qu'elle accélère ou retarde les réactions chimiques entre l'eau et les constituants anhydres.

L'élévation de la température accélère les réactions d'hydratation du ciment, elle est de la forme exponentielle.

$$V = A \cdot e^{-E/RT} \quad (1.6)$$

V : Vitesse des réactions.

A : Constante.

E : Énergie d'activation.

R : Constante des gaz parfaits.

T : Température [°K]

L'abaissement de la température diminue le taux d'hydratation des ciments en allongeant la période dormante aux très basses températures ($T^{\circ} < -10^{\circ}\text{C}$) les réactions chimiques ne se produisent plus, il est alors nécessaire d'utiliser des adjuvants accélérateurs ou de chauffer le ciment et l'eau de gâchage, le gel entraîne la destruction de la pâte du ciment durcie ou en cours de durcissement.[04]

d) Les adjuvants accélérateurs :

La plus part des accélérateurs de C3S interviennent au cours de la période précoce de l'hydratation, ils affectent essentiellement les hydrates C-S-H et $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Le chlorure de calcium est l'accélérateur le plus connu du C3S, il transforme le C-S-H fibreux treillis à mailles serrées par introduction du Cl^- dans son réseau cristallin.[04]

e) Le malaxage

Yang et Jennings ont étudié les effets de certains paramètres de malaxage sur le développement de la microstructure de pâtes de ciment quelques heures après la fin du malaxage (YANG 95). Ils observent, qu'au sein des amas de particules non désagglomérés par l'action du malaxage, l'hydratation des grains de ciment se trouve retardée de plusieurs heures. Outre un ralentissement de la cinétique d'hydratation, la persistance de ces amas constitue probablement, à plus long terme, une source de désordres microstructuraux dans les pâtes de ciment insuffisamment malaxées (YANG 95).[22]

III-4) Représentation du mécanisme de prise et du durcissement :

a) La prise du ciment :

C'est l'épaississement et la perte de mobilité de la pâte. Une des plus importantes propriétés techniques du ciment est sa rapidité de prise.

La confection des éléments devient difficile (début de prise) ou impossible (fin de prise).

Les délais de prise devront être correspondant au temps de confection des éléments.

Généralement, le gypse est utilisé en quantité de 3 à 6 %, en qualité de régulateur de prise.[04]

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte .
- la température extérieure.[06]

Le ciment durci est une véritable "roche artificielle" qui évolue dans le temps passant par trois phases :

➤ Phase dormante :

Où la pâte pure (ciment et eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent; mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.

➤ Début et fin de prise :

Après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité. C'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur.

La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où

l'aiguille de Vicat ($S = 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Les ciments de classe 35 et 45 ont un temps de prise supérieur à 1h30 à $T = 20^\circ\text{C}$. En revanche, les ciments de classe 55 et HP ont un temps de prise supérieur à 1h30 à la même température.

➤ **Durcissement :**

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.[04]

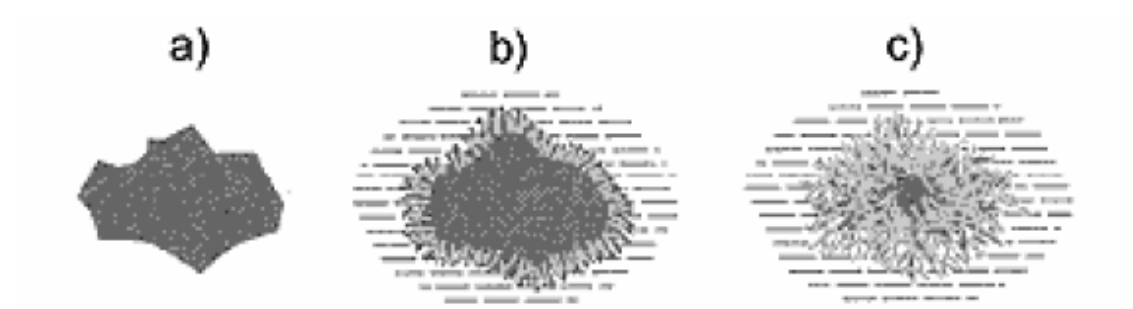


Figure. 1.11. Hydratation du grain de ciment [08].

- a) Grain de ciment avant l'adjonction d'eau
- b) Grain de ciment peu de temps après l'adjonction d'eau
- c) La plus grande partie du grain de ciment s'est transformé en gel de ciment

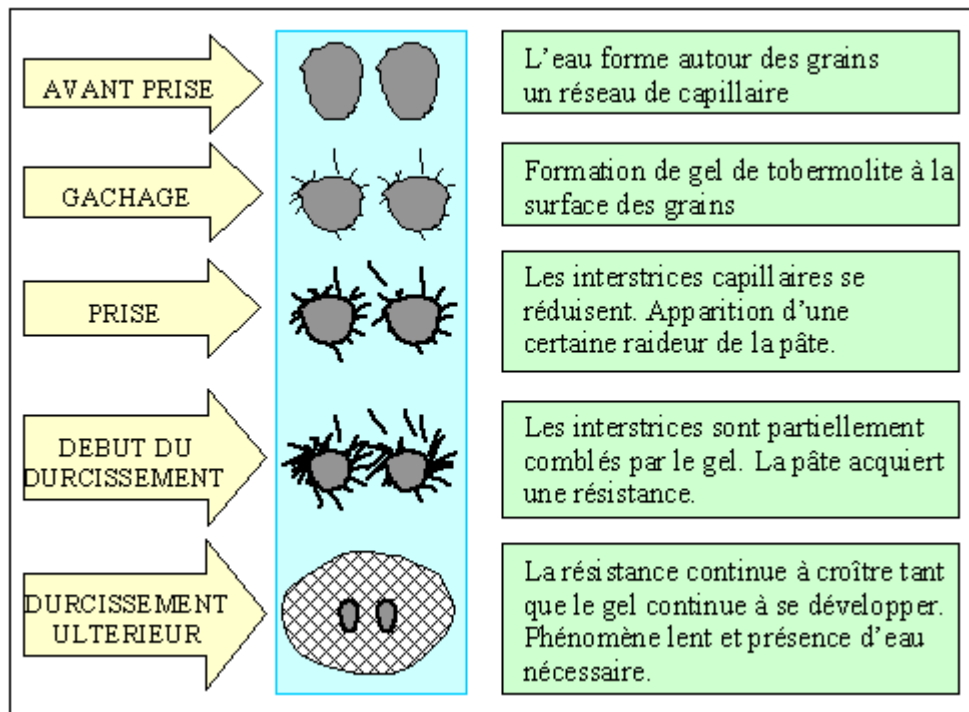


Figure. 1.12. Les phases de l'hydratation. [06]

b) Fausse prise :

Les phénomènes de la fausse prise (raidissement très rapide de la pâte empêchant la mise en place) sont généralement expliqués par une rigidification de la pâte due à la formation de gros cristaux entre les grains de ciment, (LOCHER 1977) présente 3 cas possibles de la fausse prise:

- ✓ Lorsque la réactivité de l'aluminate tricalcique et des sulfates est élevée, la quantité d'ettringite formée est tel qu'un raidissement prématuré intervient.
- ✓ Lorsque la réactivité des l'aluminate l'emporte sur celle de sulfates, c'est la formation de l'aluminate hydraté ou de mono-sulfo-aluminate de calcium hydraté qui provoque la fausse prise.
- ✓ Lorsque la solution interstitielle est sursaturée en sulfates (en raison par exemple de la présence accidentelle d'anhydrite dans le ciment), le raidissement est provoqué par la formation de cristaux de gypse.[04]

Chapitre 02

Etude bibliographique sur la pouzzolane

I). Introduction :

L'Algérie dispose actuellement de 110 barrages en exploitation dont 43 ayant une capacité plus de 10 Mm³. Le taux d'érosion spécifique atteint en Algérie

Les valeurs les plus importantes d'Afrique du Nord. Dépassant 2000 tonnes/Km²/an sur la plupart des bassins versant de l'atlas tellien, il atteint 4000 tonnes/Km²/an sur les chaînes des côtières Dahra et 5000 tonnes/Km²/an sur le bassin versant de l'oued Agrioun qui alimente le barrage d'IGIL EMDA (Remini, 1998).

En effet on admet que la durée de vie d'un barrage réservoir est la période durant laquelle sa capacité est supérieure à 50% de la capacité initiale. On constate que la majorité des barrages algériens ont une durée de vie d'environ une trentaine d'années (Demmak, 1982).

Responsable de la diminution de la capacité utile des retenues de barrages et des volumes destinés à l'alimentation en eau potable, la production de l'énergie électrique et à l'irrigation, l'envasement peut également affecter la sécurité des barrages en réduisant leur capacité de maîtrises des crues(djeddou,2000).

Les retenues aménagées étant irremplaçables. Pour réduire l'envasement de ces barrages, différentes méthodes (reboisement, barrages de décantation, surélévation des barrages, soutirages des courants de densité, dragage, etc,...) ont été utilisées. Elles peuvent être préventives ou curatives (Matari,1991).

Il est donc généralement nécessaire de combiner l'action partielle de plusieurs procédés afin de diminuer la vitesse de sédimentation et à prolonger la vie utile des réservoirs. Il arrive même, que la lutte contre l'envasement apparaisse tellement difficile et coûteuse, que les responsable de certaines réservoirs se résignent a leur comblement prématuré. Dans ce sens l'Algérie est évoquée comme exemple de l'application de cette action négative lors du C.I.G.B 1997 a Florence : « Ainsi , en Algérie, après l'envasement du barrage de Sig, sur l'oued MEKKERA en 1858, il avait été décidé de construire le barrage de Cheurfas, à 20 Km à l'amont. Il a été mis en service en 1992 » (Fontana, 1997).

Aujourd'hui encore, « l'envasement tue les barrages à petit feu ». Ce phénomène est d'autant plus crucial qu'il est important dans les pays où l'économie est étroitement liée à l'irrigation. Certes des solutions curatives existent , mais elles restent onéreuses surtout quand le mal est fait depuis trop longtemps. Les techniques de préventions et d'entretien doivent donc se généraliser.[23]

Pour pallier le déficit dans la fabrication du ciment Portland et diminuer son coût, la préoccupation de la recherche et de mettre au point un liant dans lequel sont incorporés des déchets industriels (laitiers ou cendre volante) (Gherdaoui C et Benmalek Ml, 2007) ou des ressources naturelles telles que la pouzzolane.

L'incorporation de ces ajouts minéraux actifs et inertes dans des bétons permet d'améliorer les caractéristiques de ces derniers comme il a été mis en évidence dans plusieurs recherches.[24]

II). Les dragages en Algérie:

En matière de stockage d'eau pour l'agriculture ainsi que pour l'alimentation en eau potable, l'Algérie est inévitablement appelée à développer ses infrastructures. Si pour quelque raison un retard notable a été accusé, l'avenir socio-économique est très lié aux efforts à fournir sur les besoins en eau. L'Agence Nationale des Barrages (ANB), dans son diagnostic de Janvier 2004, montre l'ampleur des risques pressentis dans un avenir très proche, si rien n'est entrepris. La construction de nouvelles réserves n'est pas la seule solution à envisager, il faut préserver les capacités existantes avec le même intérêt. Le barrage du Fergoug, dont l'histoire remonte au début de l'ère coloniale, illustre parfaitement les liens du développement de la région de Perrégaux avec la vie du barrage. Depuis la modification de son profil, le barrage de Fergoug dont la capacité de stockage était de 17 millions de m³ en 1970, a été soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout de sept années (en 1977) sa capacité a chuté à 9.67 millions de m³; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³. Après une première opération de dragage (1984-1986) où plus de 10 millions de m³ ont été récupérés par dragage et largage de vases, l'envasement du barrage est estimé aujourd'hui à plus de 14 millions de m³. Ce premier dragage a causé beaucoup de désordres en aval, suite au largage des vases. Cela traduit la complexité du problème : construire l'ouvrage, le protéger, le vidanger régulièrement, préserver le site amont et aval, La valorisation des produits issus du dragage contribue sans aucun doute au développement de la région et à la d'envasement dépassant un million de m³. Après une première opération de dragage (1984-1986) où plus de 10 millions de m³ ont été récupérés par dragage et largage de vases, l'envasement du barrage est estimé aujourd'hui à plus de 14 millions de m³. Ce

premier dragage a causé beaucoup de résolution des questions liées au largage des vases. [25]

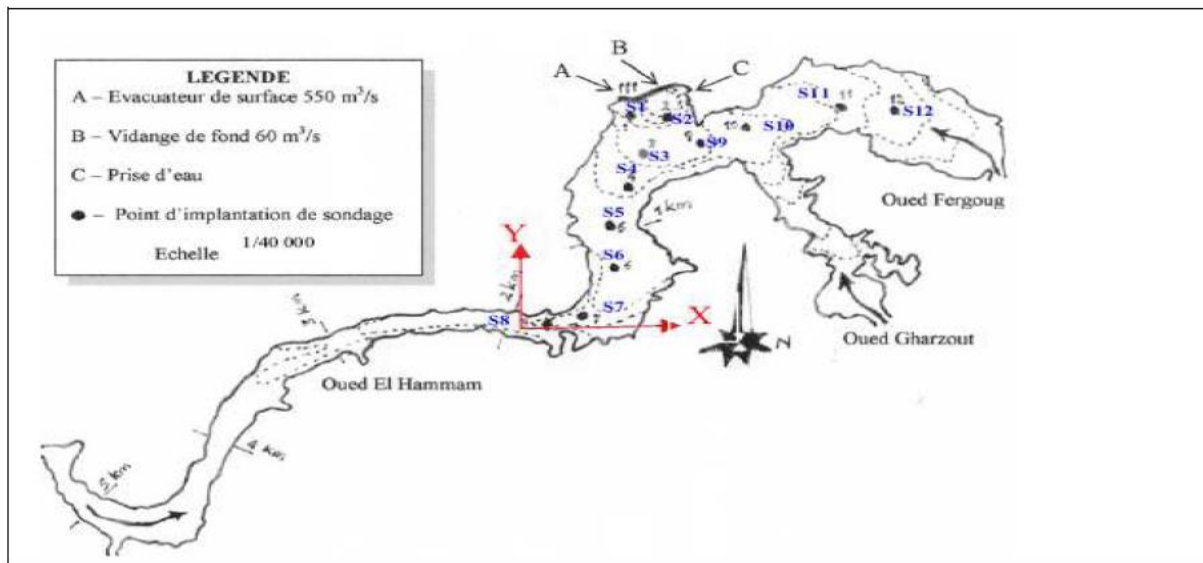


Figure 2.1 : barrage du Fergoug.[24]

III). Définition de la vase :

Le nom de vase est la désignation générale d'une large famille de sédiments fins argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau très supérieures à la limite de liquidité. La vase peut se présenter à l'état de suspension aussi bien que de sol consolidé.

Nous allons retenir finalement la définition proposée par Migniot : « Les vases sont des sédiments complexes qui couvrent une gamme étendue de particules inférieures à 40 microns mais peuvent contenir une quantité notable d'éléments sableux ».[25]

IV). 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.

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.[26]

a) 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.[11]

b) 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 figure 6. [11]

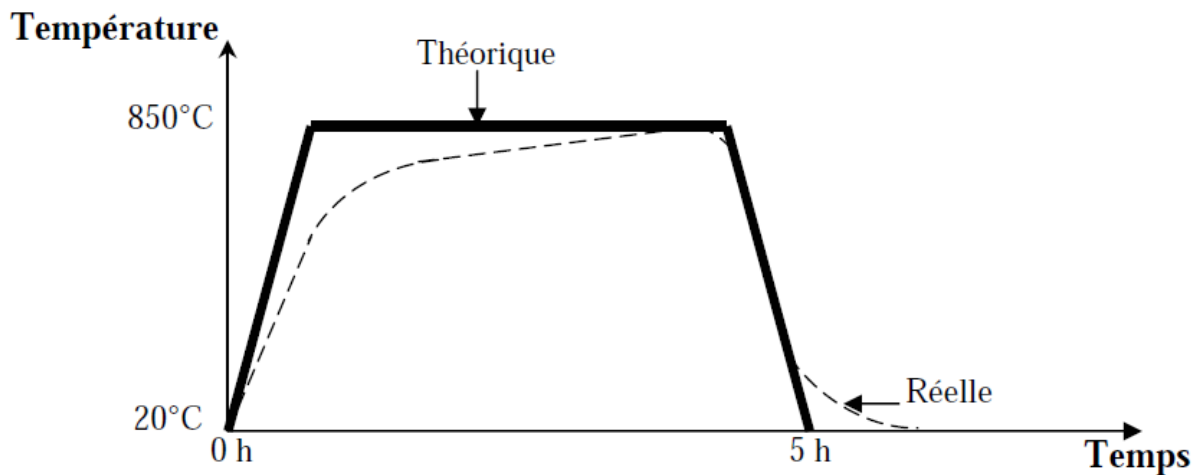


Figure 2.2: Température du four en fonction du temps [11].

V). La pouzzolane (Z) :

V.1). Historique de l'utilisation de pouzzolane naturelle dans le

monde : On a découvert qu'un béton contenant de la pouzzolane naturelle et de la chaux avait été utilisé pour garnir les parois d'un réservoir à eau, construit entre l'an 700 et 600 av., dans la ville Grecque antique de Camiros, située dans l'île de Rhodes. D'après Effstathidis [27], des cendres volcaniques provenant de Santorin, dites terre de Santorin, ont servi dans la fabrication du béton utilisé pour la construction du canal de Suez, béton dont la dureté et la durabilité demeurent évidentes encore de nos jours. La terre de Santorin continue de jouir d'une bonne réputation à titre de Pouzzolanique dans la région de Méditerranée. Pour des raisons d'économie et d'épargne d'énergie tout ciment portland fabriqué en Grèce renferme 10% de ce matériau.

Il est maintenant notoire que les Romains mettent largement en œuvre l'art et la science élaborés par les Grecs en ce qui a trait à la construction de bâtiments. Des matériaux volcaniques possédant des propriétés semblables à celles de la terre de Santorin ont été découverts à Pouzzoles, dans la Baie de Naples, et à Segni, dans le district de Latium, près de Rome. D'après Lea [28], il est possible que les Romains aient aussi utilisé des pouzzolanes provenant de tuiles broyées jusqu'à ce qu'ils découvrent les dépôts de Pouzzole et de Segni.

Il semble que les connaissances qu'ils avaient acquises dans la préparation d'un mortier résistant à l'humidité constitué à partir d'un mélange de pouzzolane et de la chaux sont répandues dans tout l'empire romain, y compris en Allemagne, en France et en Angleterre. Outre le béton utilisé pour le revêtement des aqueducs, comme le décrit Malinowski [29], le béton à la pouzzolane et à la chaux était très utilisé par les Romains

pour la construction de citernes d'eau, de murs de soutènement pour les quais et pour lier les briques de bâtiments.

Le panthéon est l'un des plus célèbres bâtiments de Rome. Ses murs, d'une épaisseur de 7 mètres, sont fabriqués d'un mortier constitué de pouzzolane et de chaux recouvert d'une mince couche de briques, tandis que son grand dôme, d'une portée de 43 mètres, a été coulé en bloc dans un béton contenant de la pouzzolane de pumicite.

D'après Collepardi [30], une quantité considérable de pouzzolane naturelle continue d'être utilisée à l'heure actuelle en Italie. En 1984, la production totale de ciment dans ce pays s'est élevée à 36 millions de tonnes métriques, environ 40% de cette production étant composée de béton de ciment portland renfermant 25% de pouzzolane. On utilise donc chaque année 3.5 millions de tonnes métriques de pouzzolane pour la fabrication de ciment portland mélangé.

En outre, toujours selon Collepardi, environ 85% soit 3 millions de tonnes métriques, de la pouzzolane utilisée est d'origine naturelle, le reste étant constitué de cendre volantes.

Selon Price [31], aux États-Unis, c'est dans le cadre de la construction de l'aqueduc de Los Angeles qu'a été faite la première grande utilisation d'un ciment portland à la pouzzolane, constitué à volume constant égaux de ciment portland et d'un tuf rhyolitique altéré en profondeur. D'après Meissner [32], La Santa Cruz Cement Company, de Davenport en Californie, a fabriqué un ciment portland à la pouzzolane contenant du schiste argileux de Montrey calciné à titre de matériaux pouzzolanique. C'est en 1920 qu'on a eu recours pour la première fois à une pouzzolane naturelle à titre d'adjuvant minéral, lorsque le Los Angeles Flood Control district a utilisé dans l'une des butées du barrage Big Dalton une pumice rhyolithique comme produit de remplacement du ciment Portland dans la proportion de 20% de son poids. Dans les années trente, cet organisme s'est servi de ce matériau à des fins semblables dans plusieurs autres constructions.

En 1933, le U.S. Bureau of Reclamation a entrepris une vaste étude portant sur l'utilisation de pouzzolanes naturelles aux fins de limitation de la chaleur d'hydratation du béton utilisé pour de grands barrages. Suivant Meilenz [33], par suite de cette recherche, la pumice rhyolitique a été utilisée à titre d'adjuvant dans le béton destiné à la construction du barrage Friant, sur le fleuve San Joaquin, et du barrage Atus, en Oklahoma. Par suite, soit en 1947, une Pouzzolane siliceuse calcinée a servi d'adjuvant minéral dans le béton des barrages Davis (entre le Nevada et l'Arizona), surtout pour limiter la réaction alcali-granulat. Les barrages Glenne Anne, Cachuma, Trenton, Monticello, Glen Canyon, Flaming Gorge, Falcon, Priest

Rapids, Wanapum et Jhon Day comptent parmi les autres constructions ayant donné lieu à l'utilisation de pouzzolane naturelle dans l'ouest des Etats-Unis.

La Chine et le Mexique figurent au nombre des pays où les ciments portland mélangés constituent de jouer un rôle important dans l'industrie de la construction. Suivant Wu [34], le tuf zéolitique et le schiste anthracieux calciné constituent les principales sources de pouzzolane naturelle en Chine.

Selon les estimations établies, 90 millions de tonnes métriques de roches zéolitiques et 6 millions de tonnes métriques de schiste anthraciteux calciné ont été produits en Chine au cours de 1984.

L'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 Km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran.

V.2). Définition de la Pouzzolane :

Le terme « **pouzzolane** » provient de pozzolanes, nom d'une ville italienne de la région de Naples. La pouzzolane naturelle est définie comme étant une roche naturelle constituée par scories volcaniques, elle possède une structure scoriacée et alvéolaire, la pouzzolane naturelle est généralement de couleur rouge ou noir et exceptionnellement grise.[35]

Les différentes définitions rencontrées présentent les produits à caractère pouzzolanique Comme :

- Des composés minéraux pauvres en chaux, et une fois en présence de chaux et d'eau acquièrent des propriétés liantes.
- Les matériaux pouzzolaniques, sont des matériaux siliceux, n'ayant pas des propriétés liantes eux-mêmes, mais contenant un certain nombre de composants qui, à température ordinaire, peuvent se combiner avec la chaux en présence d'eau pour former des produits ayant une solubilité très faible et possédant des propriétés liantes.
- La réglementation ASTM 618-71[36] sur le ciment, indique qu'une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas ou peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former un ciment.

La réaction peut s'écrire de façon très schématique comme suit :

(Silice, Alumine) + Chaux + Eau → (Silicate Calcique Hydraté, Aluminate Calcique Hydraté)

Ces dernières définitions se limitent aux cendres volcaniques qui se forment naturellement ainsi aux argiles calcinées qui peuvent réagir avec la chaux, en présence d'eau et à température ambiante.

Récemment, ces termes ont été prolongés pour couvrir tous les matériaux silicoalumineux,

qui en présence d'eau réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés

« hydratés » possédant les propriétés des ciments.

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [35]

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers :

Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins- agrégats et du retrait au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.

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

V.3). Caractéristique de la Pouzzolane :

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)[37]

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

– Sa teneur en verre $> 34\%$ [24].

✓ 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 :

$$I = R_{c28 T} / R_{c28 25PA}$$

✓ 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 centésimales des tableaux 4 et 5, cette différence est supérieure à 34% pour les deux types de pouzzolanes. Cela veut dire que nos pouzzolanes sont acides et contiennent une phase vitreuse, donc possibilité de fixer la chaux libérée par le ciment.[24]

V.4). La réaction Pouzzolanique :

1) Description de la réaction :

La réaction Pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + Eau $\Rightarrow$ silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés

La propriété pouzzolanique se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice amorphe ou dont le réseau cristallin est fortement défectueux.

L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts : [BARRET et coll., 1977 ; MAJUMDAR et coll., 1977].

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

Les produits de la réaction pouzzolanique sont des gels amorphes de type C-S-H, avec des rapports Ca/Si généralement bien inférieurs à ceux des C-S-H du ciment.

2) Occurrence des réactions :

En suivant la concentration des ions OH^- et de Ca^{2+} par unité de surface de la silice, différents types de réactions peuvent avoir lieu.

Selon URHAN [1986], différents cas peuvent se présenter:

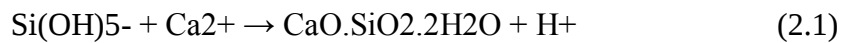
1er cas: La concentration des ions OH^- /unité de surface de la silice est si faible qu'aucune quantité significative de silice n'entre dans la solution.

Dans ce cas-ci, il n'y a ni réaction pouzzolanique ni réaction alcali-silice. On suppose que la distribution des ions OH^- dans la solution est homogène.

CLARA et HANDY [1963] ont signalé que dans les mélanges pouzzolaniques de chaux montmorillonite, il n'y a aucune formation de C-S-H si le pH de la solution est inférieur à 11.

2e cas: La concentration des ions OH⁻/unité de surface de la silice est suffisamment importante pour qu'une quantité significative de silice puisse entrer en solution.

Comme les ions Ca²⁺ sont plus aisément adsorbés que les ions K⁺ ou Na⁺ [CARROL et coll., 1954], ils seront donc privilégiés pour réagir avec la silice (silice dissoute):



Durant ces réactions, la silice continue à se dissoudre pour atteindre l'équilibre du pH.

Dans ce cas-ci:

a) Si la cinétique de la dissolution est inférieure à celle de la cristallisation du C-S-H, et si la concentration de Ca²⁺ est suffisamment importante dans ce cas là, il y aura formation d'une couche d'hydrates sur la surface de la silice bloquant ainsi l'attaque (groupes extérieurs de silanol) des ions OH⁻ et la dissolution s'arrête.

Comme le taux de dissolution de la silice et la concentration de la solution en ions Ca²⁺ dépendent du pH, on peut considérer que le taux de dissolution de silice augmente énergiquement pendant que la concentration de Ca²⁺ diminue.

Comme l'ion Ca²⁺ est bivalent, ses charges positives peuvent neutraliser les charges négatives de deux molécules de silice en dissolution (ou déjà dissous).

Les charges négatives qui ne sont pas neutralisées par les ions Ca²⁺ peuvent être alors neutralisées par les alcalins. Cependant, la quantité de ces derniers dans la composition chimique du produit de réaction, dans ce cas-ci serait très basse. Il est bon de rappeler que les résistances mécaniques des pâtes de ciments hydratées diminuent et le retrait de séchage/ gonflement augmentent proportionnellement avec la quantité d'alcalins rentrant dans la composition chimique et cela même avec une teneur optimale en SO₃ [JAWED et coll., 1978].

b) Si la cinétique de dissolution de la silice est plus grande que celle de la cristallisation des C-S-H (qui implique une concentration plus élevée en ions OH⁻ et basse en Ca²⁺ que dans le cas a), des C-S-H stables ne peuvent pas être formés.

La partie dissoute de la silice est alors détachée de la surface et les ions Na⁺, K⁺ peuvent pénétrer dans la silice dissoute pour neutraliser les charges négatives.

Les ions OH⁻, Ca²⁺, Na⁺ et K⁺ sont encore adsorbés sur la surface de la silice (la couche

au dessous de celle détachée). Ce processus continue jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

La diminution du pH par la consommation des ions OH^- et la neutralisation des charges négatives de la silice dissoute favorisent la polymérisation. Le produit de réaction est alors un silicate alcalin gélatineux.

La pénétration des alcalins dans la structure entraîne une augmentation de volume, réduit la force mécanique, augmente probablement le retrait de séchage et le gonflement du produit de réaction.

La cinétique de ces réactions est très lente. On peut supposer qu'à long terme, si le taux de dissolution est très bas et que la solubilité est importante, les ions Ca^{2+} adsorbés peuvent se cristalliser en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (l'environnement riches en ions OH^-) ou peuvent subir la carbonatation ce qui réduirait leur possibilité à réagir avec la silice dissoute.

3e cas: La concentration en ions OH^- /unité de surface de la silice est de sorte que la quantité de silice dans le mélange est égale à la concentration d'équilibre avec le pH.

Comme montre par GLASSER et KATAOKA [1981], dans cette condition la quantité de gel gélatineux produite est maximale. Ces auteurs ont montré que pour le gel de silice, cette concentration correspond à un rapport molaire de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ se situant entre 4 et 6. La composition du mélange qui entraîne une expansion maximale, a un rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 5,7 [DIAMOND et coll., 1974].

Si la quantité de silice dans le mélange est inférieure à la concentration d'équilibre, il y aura non seulement peu de produits de silicate-alcalin gélatineux, mais le produit de réaction sera riche en alcalins. Selon VIVIAN [1950], les gels riches en alcalins sont moins dangereux en raison de leur faible viscosité.[38]

V.5). Définition de l'activité Pouzzolanique :

L'activité pouzzolanique ou pouzzolanité 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 quartzéuse, quelle que soit leur origine : matériaux naturels (gaize, diatomites, cendres volcaniques) matériaux artificiels (cendres volantes, fumées de silice, argiles calcinées, cendres de balles de riz).

L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts : [MASSAZZA, F., (1976)],

[MASSAZZA, F., et al. (1979)], [MAJUMDAR, A. J., et al. (1977)], [DRON, R., (1978)],
[DRON, R., et al. (1978)], [BARRET, P., et al. (1977)] [KONDO, R., et al. (1979)],
[BLOMBLED, J.P., (1985)].

- ✓ 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. [39]

V.6). Facteurs affectant à la réaction Pouzzolanique :

Pour les mélanges ciment (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau Pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité [MASSAZZA, 1976]. L'addition de petites quantités de bases tel le NaOH [METSO et coll., 1979] ou une température élevée [MASSAZZA et coll., 1980] s'avèrent de bons accélérateurs de la réaction Pouzzolanique.

La teneur en chaux, le rapport eau/liant du mélange et le pH de la solution interstitielle sont également considérés comme facteurs influençant la réaction pouzzolanique [FOURNIER et coll., 1978].[38]

V.7). Types de pouzzolane :

➤ Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre.

La pouzzolane naturelle est essentiellement composée de silice ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) doit être supérieure à 70% selon la norme ASTM C618 [50].

Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618). [40]

➤ Pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille ,soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi la schiste cuite, et les déchets de l'industrie a base de méta kaolinite. [41]

V.8). Comportement de La pouzzolane :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

✓ A l'état frais

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

✓ A l'état durci

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

- Accroissement de la résistance finale à long terme.
- 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. [42]

V.9). Effet Pouzzolanique :

puisque les pouzzolanes naturelles contiennent de 40% à 80% de SiO_2 , la mise en œuvre de principal effet Pouzzolanique donne lieu à la formation de silicate de calcium hydraté (CSH), semble à celui qui est produit par suite de l'hydratation du principal composé de silicate de calcium (c'est-à-dire C_3S) que renferme le ciment portland.



En raison de la teneur de l'effet Pouzzolanique, le taux d'accroissement de la résistance ainsi que la chaleur d'hydratation liés à cette réaction se révèlent faibles. En revanche, l'hydratation du C_3S dans le ciment portland est rapide, de sorte que le taux d'accroissement de la résistance et la chaleur d'hydratation y afférents sont élevés. Il convient aussi de noter l'effet pouzzolanique donne lieu à une consommation de la chaux, alors que l'hydratation constitue une réaction donnant lieu à une production de la chaux.[43]

V.10). 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 importants de la vase accumulée dans la retenue surtout dans le domaine des bétons pouzzolaniques et dans la construction des barrages vu les volumes importants que consomme la construction d'un barrage ce qui va influencer sur le prix de revient de l'ouvrage et par la suite sur le prix du mètre cube d'eau mobilisée.

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

- 1- Remboursement des coûts de l'opération de d'évasement.
- 2- Augmenter le volume du réservoir pour répondre au besoin de l'irrigation.
- 3- Répondre aux besoins croissants 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 (Kenai, Goudjil et Idir, 1998).[23]

a) Intérêt du point de vue économique :

La transformation de la crue (argile et calcaire) en clinker nécessite une dépense d'énergie très importante. L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction du taux de substitution en ajouts.

Ces derniers sont des produits de faible coût. Plusieurs pays dans le monde comme la Chine, la Grèce, l'Inde, l'Italie et le Mexique utilisent des millions de tonnes de ciment portland composé pour économiser l'énergie.[44]

b) Intérêt du point de vue technique :

Les ciments composés présentent souvent des avantages du point de vue technique. La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C_3A du liant composé de clinker et d'ajout, par conséquent on diminue le risque de dégradation produit par les sulfates. En général, les additions minérales diminuent la taille des pores dans la pâte de ciment.

Selon une étude faite par P.K.Mehta [26], sur la variation de la taille des pores dans une pâte de ciment avec addition de la pouzzolane naturelle en fonction du temps, les résultats de cette étude montrent que la distribution des pores d'une pâte de ciment varie en fonction de l'âge ou les gros pores supérieurs à $1000 \text{ \AA}$ disparaissent à long terme pour des pâtes renfermant 20% et 30 % de pouzzolane.

N.Kaid [45] a étudié l'influence de l'ajout de la pouzzolane de Beni Saf et d'un adjuvant superplastifiant sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et la variation de la déformation différée des mortiers contenant 2% de superplastifiant avec différents pourcentages de l'ajout pouzzolanique 5%, 10% et 15%, ont été conservés à une température de $15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Les résultats obtenus indiquent que :

- L'augmentation du taux de la pouzzolane accroît sensiblement la demande en eau nécessaire à l'obtention d'une consistance normale et retarde la prise de la pâte du liant.
- L'ajout pouzzolanique a engendré, par rapport au mortier témoin, une diminution de la résistance en compression et en traction aux jeunes âges, les mortiers contenant 5% et 10 % de pouzzolane et 2 % de superplastifiant développent des résistances significatives au-delà de 14 jours, de grandes résistances ont été constatées entre 28 et 270 jours pour les mortiers contenant 10% et 15 % de pouzzolane et 2 % de superplastifiant.

-Les essais de la porosité ouverte à l'âge de 540 jours, montrent, une chute d'environ 5% pour toutes les compositions testées.cette chute est plus marquée pour le mortier contenant 10% de la pouzzolane naturelle et 1% de superplastifiant.

- Les déformations différées du mortier témoin, en revanche celle du mortier contenant 5 % d'ajout diminue d'environ 30%.

N.Belas Belaribi et A.Semcha,A.Laoufi.[46] ont confectionné trois bétons à base de pouzzolane naturelle de Béni saf (20,25 et 30%)et un béton témoin. Les résistances à la compression ont été mesurées à différentes échéances (1, 7, 14, 28, 60,90) jours. Les résultats obtenus montrent en évidence que les bétons renfermant de la pouzzolane naturelle présentent de résistance à la compression faibles au jeune âge par rapport aux bétons sans ajout, après 28 jours le béton avec 20% de l pouzzolane naturelle atteint presque la même résistance que le béton témoin.

Ce sont que des exemples parmi plusieurs recherches qui sont faites sur la valorisation du pouzzolane.[44]

Chapitre 03



Etude bibliographique sur les
propriétés thermiques

I). Introduction :

Les réactions du ciment Portland en présence d'eau ou "hydratation" produisent des composés hydratés qui permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulat ce qui confère au béton et au mortier ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte. L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions d'hydratation dont la grandeur dépend de la composition du ciment. La dynamique des réactions d'hydratation va dépendre de nombreux facteurs tels que finesse de mouture, composition, ajout d'éléments secondaires (gypse par exemple). Ces propriétés liées aux réactions d'hydratation doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à sa mise en forme. Elles doivent aussi permettre au produit de durcir dans un temps suffisamment court pour pouvoir poursuivre les travaux de construction.

Les réactions exothermiques peuvent engendrer des dégradations lors du refroidissement du béton telles que fissures de retrait thermique lors de refroidissement trop rapide, fissures aux interfaces entre ancien et nouveau béton (reprise de bétonnage). Ce risque de fissure peut aussi être dû à un retrait lors de la prise du ciment. Les réactions du ciment consomment une partie de l'eau de gâchage et cette perte peut entraîner des forces capillaires produisant un retrait de la pâte de ciment que l'on nomme retrait d'autodessication.

La chaleur dégagée est particulièrement importante pour les ouvrages massifs, tels que les barrages. La température à l'intérieur des grandes masses de béton peut augmenter de plus de 50°C par rapport à la température du béton lors de sa mise en place. Le retrait est la principale cause des fissures qui peuvent apparaître dans les bétons de grande masse. Le retrait thermique se produit lorsque la température baisse. Pour éviter une augmentation de température trop importante, on peut refroidir artificiellement le béton à l'aide de tuyaux noyés dans la masse et dans

lesquels on fait circuler de l'eau froide. D'autre part, on peut également utiliser des ciments spéciaux à basse chaleur d'hydratation. [48]

La connaissance de la réponse thermique du ciment est important dans la conception et la construction de haute premiers mélanges de béton ainsi que la force de masse des structures en béton. C'est parce que ces structures présentent un potentiel élevé pour le craquage à la suite de contraintes induites par les gradients de température dans le béton. Résultats de production de chaleur à partir des réactions d'hydratation du ciment et de la quantité de chaleur ainsi que la vitesse à laquelle cette chaleur est évoluée en fonction des caractéristiques minéralogiques et morphologiques du clinker de ciment. Cette page explique une technique pour l'évaluation de la chaleur d'hydratation.[46]

II). C'est quoi le jeune âge :

Il n'y a pas de définition précise du « jeune âge ». Ce terme peut signifier les premières heures, les premiers jours ou dans certains cas les premières semaines. Cela dépend du problème en question c'est-à-dire suivant le type de structure ainsi que les objectifs visés.

Ainsi le jeune âge du béton début avec le début de prise c'est-à-dire quelque heures après le gâchage lorsque les propriétés thermiques du béton commence à décroître, (1 à 3 jours) pour un béton subissant un durcissement à 20°C.[47]

III). C'est quoi la chaleur d'hydratation :

La chaleur de l'hydratation est la chaleur générée quand l'eau et de ciment portland réagir. La chaleur d'hydratation est la plus influencée par la proportion de C₃S et C₃A dans le ciment, mais est également influencée par l'eau-ciment , la finesse et la température de cuisson . Comme chacun de ces facteurs est augmentée, la chaleur augmente d'hydratation. Dans les grandes structures en béton de masse tels que barrages-poids, la chaleur d'hydratation est produit beaucoup plus rapidement qu'elle ne peut être dissipée (en particulier dans le centre de grandes masses de béton), ce qui peut créer des températures élevées dans le centre de ces grandes masses de béton qui, à son tour, peut provoquer des contraintes indésirables que le béton se refroidit à température ambiante. Inversement, la chaleur d'hydratation peut aider à maintenir les températures de cuisson favorables pendant l'hiver (PCA, 1988).[46]

III.1). Chaleur d'hydratation du ciment :

Quand le ciment portland réagit avec l'eau, il y a dégagement de chaleur qui peut être mesurée par le calorimètre à conduction thermique (isotherme).

Donc, le dégagement de chaleur et ainsi l'évolution de l'hydratation pourront être suivis dans le temps [54].

Les étapes successives de l'hydratation du ciment pendant 24 à 48 heures peuvent être suivies grâce à un calorimètre, par la courbe d'évolution de la chaleur dégagée par les réactions

qui sont exothermiques (au cours du temps, ce qui traduit l'avancement de la réaction d'hydratation du ciment.

Il existe trois pics-trois maximums de dégagement de chaleur (**Figure 3.1**) :

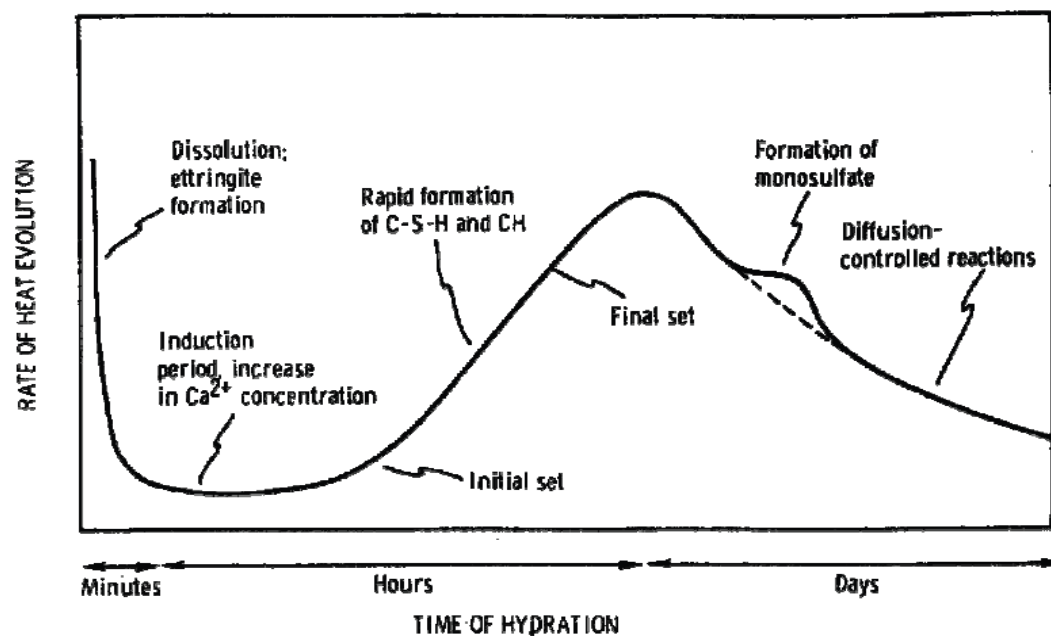


Figure 3.1. Courbe calorimétrique relevée pendant l'hydratation d'un ciment [54].

➤ **Le premier pic :**

Dans les conditions d'hydratation d'une pâte de ciment dans l'eau, c'est le pic de flux le plus intense mais de durée plus brève.

C'est le plus haut, mais il est de courte durée. Il est suivi d'une "*période dormante*" dans laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul).

Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte.

Les phénomènes physiques et chimiques régissant cette phase (période dormante) sont du point de vue pratique très importants, car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton.

Pour un rapport E/C = 0,5, on devra placer le béton dans la structure au plus tard au milieu de la "*période dormante*".

Il correspond au mouillage du solide, au début des réactions de dissolution de toutes les phases et sulfate) et la précipitation des hydrates tels que l'hydro silicate de calcium (C-SH) et l'étringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) par rapport auxquels la solution de gâchage est très

rapidement sursaturée à cause de son faible volume en regard de la quantité de solide.

La dissolution et la précipitation étant des phénomènes respectivement exo et endothermique, la variation du flux total traduit simplement la différence de vitesse relative des deux réactions.

A l'issue de ce premier pic commence une période de faible activité thermique. Sa durée est liée au nombre de germes de (C-S-H) précipitées pendant la nucléation compte tenu du fait que l'évolution du flux thermique lié à l'hydratation des aluminates à cet instant est faible.

➤ **Le second pic :**

Est attribué le plus généralement à l'hydratation du silicate tricalcique. Par rapport au premier pic, il est moins intense et beaucoup plus large, ce qui témoigne d'une réaction cinétiquement plus lente mais de durée supérieure.

La "*période dormante*" prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur et de la prise du ciment. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 20 °C) entre

9 heures et 10 heures.

Très schématiquement, l'accélération de l'hydratation du C3S représentée par la partie ascendante du second pic est due à la croissance des (C-S-H) qui sont nucléés à la surface au cours du premier pic. Le ralentissement qui survient ensuite traduit le recouvrement total de cette surface par les hydrates et met en évidence que la réaction est limitée par un processus diffusionnel.

*** Le troisième pic :**

Ce ne sont pas tous les ciments qui présentent un troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un ciment à un autre. Quand il est visible, le troisième pic apparaît généralement comme un épaulement dans le second pic tel que le montre la figure 3.1.

La première attribue ce pic à la transformation de l'ettringite au moment où la quantité de sulfate initiale présente est totalement épuisée. A cet instant, devenant sous-saturée par rapport à cet hydrate, l'ettringite se dissout et forme avec le C3A restant le monosulfoaluminate de calcium hydraté. Cette transformation, appelée aussi conversion, ne serait visible que pour le taux de C3A dans un ciment supérieur à 12% ou à une teneur en sulfate supérieure à 3% pour 10% de C3A.

La seconde, qui apparaît comme la plus répandue dans la littérature, identifie le pic comme étant une reprise de l'hydratation de C3A. Des observations microscopiques sur des grains de ciment hydratés semblent montrer qu'elle s'accompagnerait d'une formation secondaire d'ettringite dont la morphologie est de type aiguille.

Des expériences récentes menées au Laboratoire de Recherche sur la réactivité des solides à l'université de Bourgogne (Dijon) sur le sujet montrent que chaque hypothèse comporte une part de vérité. En effet, le suivi des concentrations ioniques des espèces

présentes dans le système $C_3A-CaSO_4-Ca(OH)_2$ établie sur le pic de flux thermique enregistré coïncide avec disparition de sulfate en solution simultanément à la réapparition d'ions aluminates.

Il semblerait donc qu'il ait arrêt de la précipitation d'étringite tandis que le C_3A continue à se dissoudre. Le dégagement de chaleur ne serait la conséquence alors que de cette réaction fortement exothermique.

Les réactions chimiques d'hydratation des liants hydrauliques se font avec un certain dégagement de chaleur qui commence avec le début de prise.

De grandes différences existent entre les chaleurs dégagées par les différents liants Hydrauliques (Tableau 3.1). Elles proviennent :

- * **des constituants minéralogiques** : le C_3A et le C_3S dégagent le plus de chaleur, une addition de laitier ou de cendres volantes diminue cette chaleur au moins aux premiers âges,

- * **De la finesse de mouture** : plus le ciment est broyé finement et plus la chaleur d'hydratation est élevée (corrélativement, plus ses résistances mécaniques sont élevées). Pratiquement, 25 % de la chaleur se dégage entre le début et la fin de prise.

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment (Figure 3.2).

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland sans ajouts. Les cendres volantes et le laitier sont souvent utilisés

dans les bétons de masse lors de la construction de barrages ou d'ouvrages massifs [49].

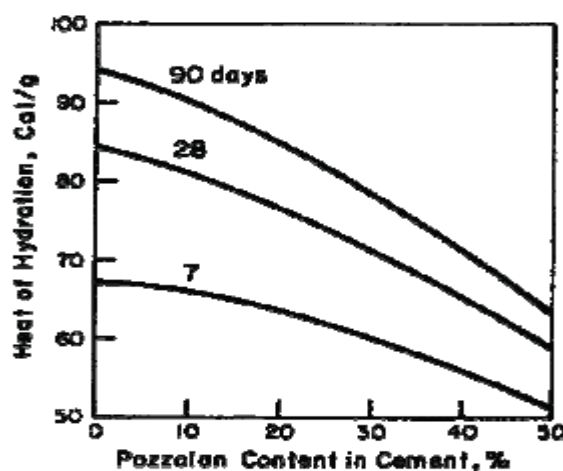


Figure 3.2. Effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment [35].

Constituant du ciment Portland	Chaleur d'hydratation (joules/g)		
	7 jours	28 jours	6 ans
C ₃ S (3CaOSiO ₂)	460	502	502
C ₂ S (CaSiO ₂)	84	189	251
C ₃ A (3CaOAl ₂ O ₃)	773	857	865
C ₄ AF(4CaOAl ₂ O ₅ Fe ₂ O ₃)	168	209	293

Tableau 3.1. Chaleur d'hydratation des principaux minéraux du ciment [41].

Par ailleurs, au très jeune âge il se produit un effet de protection temporaire du laitier sur le ciment anhydre, qui peut générer un décalage dans le temps du pic de chaleur et une

diminution de l'intensité maximale de la température (Berthollet, 2003, Grosse *et al.*, 2001 ;

Robeyst *et al.*, 2008).

On constate pour les deux ciments que le pic est retardé lorsque le rapport E/C augmente. Cela vient du fait que la prise étant plus lente pour ce type de rapport, le dégagement de chaleur est également plus lent.[53]

Période	Processus chimique	Processus physique
Gâchage	Dissolution rapide des constituents du ciment, formation du CSH et d'ettringite.	Fort dégagement de chaleur (1 ^{er} pic thermique)
Dormante	Augmentation rapide du pH et de la teneur en Ca ²⁺ de l'eau de gâchage, ce qui induit un ralentissement de la dissolution des constituents du ciment. Formation lente de CSH et d'ettringite et sursaturation en chaux de la phase aqueuse.	Inertie thermique et augmentation lente de la viscosité
Prise	Accélération de la dissolution des constituents du ciment grâce à la diminution de la teneur en Ca ²⁺ par la formation de Ca(OH) ₂ . Hydratation de C ₃ S pour donner du CSH et de la portlandite.	Augmentation du flux thermique, solidification et diminution de la porosité
Ralentissement	Epuisement du gypse et formation du monosulfo-aluminate de calcium par la réaction des ions sulfates (provenant de l'ettringite) avec le reste des aluminates. Accélération de l'hydratation des C ₃ S et C ₂ S.	Deuxième pic thermique et diminution de la porosité
Durcissement	Ralentissement des réactions du fait que les grains anhydres sont recouverts d'hydrate de plus en plus épais.	Diminution du flux thermique et de la porosité

Tableau 3.2. Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment [49].

Le tableau ci-dessous définit les principales caractéristiques des constituants du ciment portland :

Constituant	Chaleur dégagée	Comportement des constituants purs
C_3S	500 J/g	- fait prise et durcit rapidement - haute résistance atteinte à court terme
C_2S	260 J/gr	- réagit lentement - haute résistance atteinte à long terme
C_3A	865 J/gr	- prise de façon très désordonnée et rapide - faible résistance (nécessite du gypse pour régulariser la prise)
C_4AF	418 J/gr	- faible résistance

Tableau 3.3. : Chaleur d'hydratation de principales constituantes du ciment et leur comportement.[48]

Les chaleurs spécifiques retenues de l'étude de Van Breugel (1991) sont celles trouvées par

Bogue (1929). Tout comme dans le calcul de Taylor (1997), il ne considère que les quatre

principales phases constituant le ciment soit C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF .

Le tableau suivant résume les valeurs de q_i proposées par Bogue et Taylor :

tel que q_i : chaleur d'hydratation de la phase considérée [J/g]

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
q_i par Bogue (en J/g)	560	260	866	125
q_i par Taylor (en J/g)	510	247	1356	427

Tableau 3.4. : Chaleur d'hydratation selon Bogue et Taylor.[49]

La différence majeure entre les chaleurs d'hydratation des composants proposées par

Bogue (Van Breugel (1991)) et celles proposées par Taylor (1997) concerne le C3A. Celui ci réagit d'abord avec le gypse pour donner de l'ettringite (AFt) instable en libérant 624 J/g de chaleur. La conversion de l'ettringite en monosulfate stable (AFm) dégage une chaleur de 866 J/g. Cette valeur correspond à celle utilisée par Bogue qui ne prend donc pas en compte la réaction des C3A avec le gypse. Si on ajoute les chaleurs des deux types de réactions, on a une chaleur totale de 1490 J/g. Cependant, tout le C3A ne réagit pas avec le gypse, c'est pourquoi Taylor a une valeur de chaleur d'hydratation du C3A de 1356 J/g. Enfin, Van Breugel (1991) utilise une équation phénoménologique de Mills (1966) afin d'exprimer le degré d'hydratation maximum sous condition de cure normale :

$$\alpha_{max} = \frac{1.031 \times W/c}{0.194 + W/c} \dots\dots\dots (1.3)$$

Cette valeur n'est retenue qu'à titre indicatif de la valeur maximale d'hydratation qu'il est possible d'obtenir.[49]

III.2). Effet de la chaleur d'hydratation :

Les ciments ont une chaleur d'hydratation d'autant plus faible que la teneur en laitier est plus forte (figure 10), la température au cœur du béton est donc plus faible avec les fortes teneurs en laitier, ce qui réduit le risque de fissuration et fait conseiller l'emploi des CHF et des CLK pour les grandes masses de béton. La mise en œuvre de ces ciments est plus facile par temps chaud, par contre, par temps froid, ils sont plus sensibles au gel que les autres [42]

III.3). La vitesse d'hydratation :

Les vitesses d'hydratation dépendent évidemment de la composition du ciment mais aussi de la finesse de mouture du produit. Un ciment fin, donc avec une surface spécifique élevée, aura une réactivité plus importante. La température du milieu influence aussi la réactivité; à température élevée la réactivité est nettement plus forte.[13]

Les réactions d'hydratation des ciments sont exothermiques, c'est à dire qu'elles s'accompagnent d'un dégagement de chaleur qui provoque une élévation de la

température du béton qui elle-même accélère les réactions chimiques d'hydratation ; ces réactions sont dites thermoactivées.

La quantité et la vitesse de dégagement de la chaleur varient notamment en fonction de la composition minéralogique et de la finesse du ciment.

La température est également utilisée dans la préfabrication d'éléments en béton afin d'accélérer son durcissement et augmenter la cadence de production.

L'exothermie des réactions d'hydratation est à l'origine du retrait thermique intervenant aux jeunes âges, pouvant conduire, en l'absence de précautions, à une fissuration dans le cas du coulage d'éléments massifs.

Par ailleurs, un échauffement excessif du béton aux très jeunes âges, que ce soit du fait de l'exothermie naturelle ou d'un traitement thermique, peut aussi dans certains cas favoriser le développement de la réaction sulfatique interne et nuire sévèrement à la durabilité du béton.[64]

III.4). Degré d'hydratation des liants :

En l'absence de pouzzolane, le degré d'hydratation final (c'est-à-dire après un temps d'hydratation théorique infini) du ciment dépend du rapport en masse eau sur ciment.

L'hydratation consomme environ 0,43g d'eau par gramme de ciment hydraté (0,22g D'eau chimique liée + 0,21g d'eau absorbée non disponible pour le reste de l'hydratation) (POW46,POW47). On devrait donc avoir un degré d'hydratation final $\xi(\infty)$ du ciment égal à 1 pour des rapport e/c supérieur à 0,43 et un $\xi(\infty)$ proportionnel à e/c pour des rapport inférieur à cette limite.

En pratique le degré d'hydratation final du ciment n'atteint jamais la valeur 1 même pour des rapport e/c supérieurs à 0,43 en raison d'une densification progressive de la couche d'hydrates autour des grains de ciment anhydre, au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation. Le modèle empirique suivant, construit sur la base de nombreux résultats expérimentaux permet d'estimer convenablement cette valeur finale [WAL00].

$$\xi(\infty) = 1 - \exp(-3,3 \text{ e/c}) \dots\dots\dots(2.3)$$

Où e/c est le rapport en masse entre les quantités d'eau et de ciment dans le béton.

Par exemple pour e/c égal 0,4 on obtient $\xi(\infty) = 0,73$ et pour e/c= 0,6 on obtient $\xi(\infty) = 0,86$.

Lorsqu'une pouzzolane est présente, elle réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment (0,3g de chaux produite environ par gramme de ciment hydraté).

Le degré d'hydratation final dépend alors du rapport entre la quantité de chaux disponible, elle-même fonction du degré d'hydratation final du ciment, et la quantité de pouzzolane [WAL00].

Pour une fumée de silice :

$$\xi_z(\infty) = \min \left(1, \frac{A_s(\infty)}{Z/C} \right) \dots\dots\dots (3.3) \quad \text{Ou :}$$

✓ Z/C est le rapport en masse pouzzolane sur ciment dans le béton ;

✓ $A = 0,23$ pour une fumée de silice ; ou 0,3 pour une cendre volante.

En présence de pouzzolane, le degré d'hydratation final $\xi(\infty)$ est diminué, ceci en raison d'une fixation d'eau absorbée dans la réaction pouzzolanique [JUS 92a, JUS 92b]. La valeur réduite se calcule comme suit [WAL00] :

$$\xi_z(\infty) = 1 - \exp [-3,3(e/c - \delta)] \dots\dots\dots (4.3) \quad \text{avec} \quad \delta = D \exp (1,6 e/c) \xi_z(\infty) z/c \dots\dots\dots (5.3)$$

Ou : $D = 0,6$ pour une fumée de silice, et 0,4 pour une cendre volante.

En présence de pouzzolane du fait qu'il intervient dans le terme δ par le biais du terme $\xi_z(\infty)$, le degré d'hydratation final du ciment est donc défini par une fonction implicite du type $X = f(X)$ qu'on résout aisément par itération [52]

IV). Propriétés thermiques :

La conduction thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (i.e. la porosité), en ajoutant l'air intra-particule (i.e. du granulat). A titre comparatif, un béton hydraulique (= 2300 kg/m³) a une conductivité thermique de 2,0 W/(m.K) tandis qu'un béton d'argile expansé (= 1600 kg/m³) a une conductivité thermique de 0,60 W/(m.K).

Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'un autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement. Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ($f \sim 80\%$) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible (**Figure 3.3.**). [51]

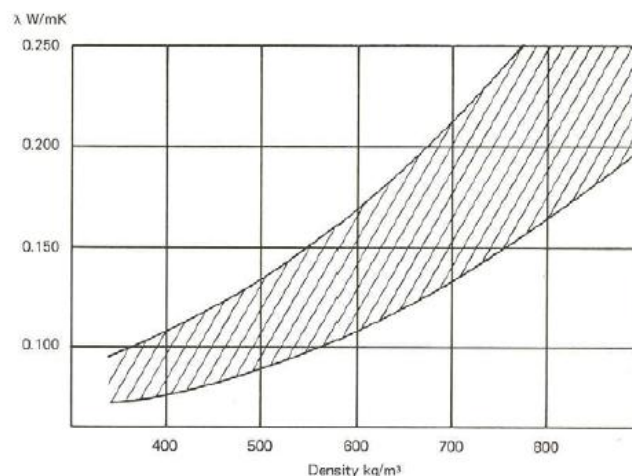


Figure 3.3. : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche cellulaire [ACC, 78]

V). Analyses thermogravimétriques (ATG) :

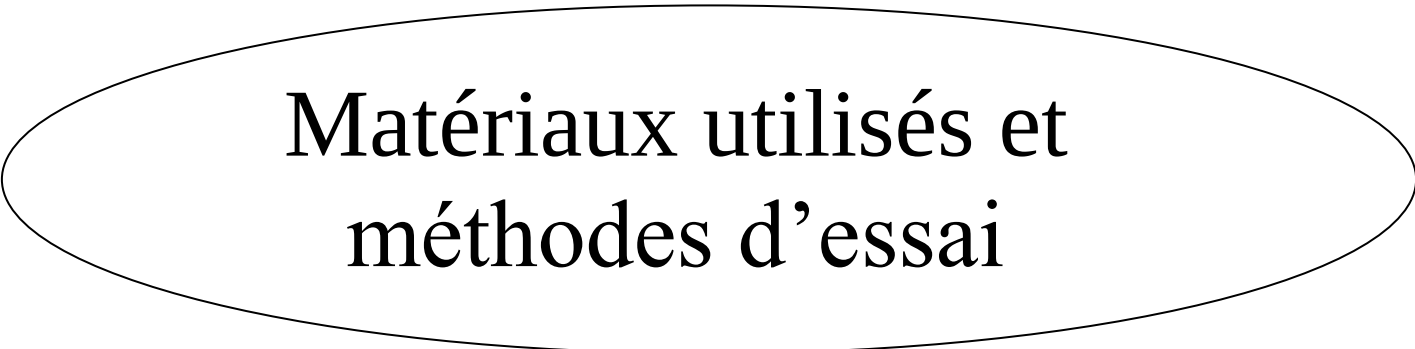
L'analyse thermo-gravimétrique (ATG) consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température.

La libération des ions hydroxydes OH^- liés aux cations ainsi que celle du CO_2 s'accompagne par une perte de poids de l'échantillon analysé. La technique d'ATG permet d'identifier les principaux minéraux par cette perte de poids. Elle donne aussi des informations sur la déshydratation des matières premières et permet l'étude des mécanismes mettant en jeu un transfert de masse entre un solide et une phase gazeuse.[25]

L'analyse thermique nous permet de disposer d'un outil de quantification de la portlandite

et de CaCO_3 , ainsi que d'un suivi qualitatif de la formation du C-S-H et de l'ettringite.
[55]

Chapitre 04



Matériaux utilisés et
méthodes d'essai

I). Introduction :

La fabrication de matériaux de construction est une nécessité pour l'économie, principalement au profit du développement des infrastructures immobilières. L'utilisation de matériaux de construction importés (équipements et produits de transformation) engendre des coûts prohibitifs au détriment de la croissance économique nationale.

Il est donc nécessaire que des mesures incitatives à la promotion des matériaux locaux de construction soient encouragées pour favoriser la valorisation des ressources locales et le développement de l'esprit d'initiative.

Ainsi, ces matériaux ont l'avantage d'être compétitifs, disponibles à des prix défiant toute

concurrence et en parfaite harmonie avec notre milieu ainsi que nos conditions de vie.

En plus, ils ont l'avantage de contribuer à l'économie créant des emplois et des sources de revenu

aux citoyens.

Mais plus encore une diminution des coûts de transport, l'indépendance par rapport aux fluctuations de prix ou à d'éventuels problèmes politiques, la création d'une industrie locale

donc d'emplois.

Il existe également d'autres raisons, plus philosophiques : indépendance et fierté nationale, développement endogène, promotion d'une architecture vernaculaire, logique de construction, intégration aux sites.[11]

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, celles-ci permettent de mesurer les paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement de l'ensemble.

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon nécessaire à l'essai peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60°C dans le cas contraire. [56]

II). Matériaux utilisés :

1. Le ciment :

Le ciment utilisée dans tous les essais est un ciment portland artificiel CPA-CEMI 42.5-ES. Fabriqué selon la norme algérienne : NA 443-2002 ; ça provenance est de la cimenterie de Zahana ; ces caractéristiques minéralogique et chimiques sont comme suit :

I. 1) Caractérisation Physico-chimiques du ciment :

1) La finesse du ciment : est caractériser par la surface spécifique Blaine, est mesurée ; en utilisant le perméabilimètre de Blaine.

2) La masse volumique absolue : est mesurée au densimètre le chatelier.

3) Le début et la fin de prise mesurés sur une pate du ciment de consistance normalisée $E/C = 0,25$, en utilisant l'appareil de Vicat.

4) Consistance normale :

Pour la détermination de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour la fabrication d'une pate de ciment a consistance normale.

On peut utiliser un des deux essais :

- ✓ Soit a l aide de l appareil de Vicat.
- ✓ Soit à l'aide de l'essai d'écoulement au cône.

L'essai de consistance est effectué avec l'appareil de Vicat.



Figure 4.1 Pénétration d'une

d'une

sonde Ø10mm[36]

1.13mm[36]



Figure 4.2 Pénétration d'une sonde

aiguille Ø

500g de liant (seul ou avec ajout selon le cas) introduit dans la cuve du malaxeur, la quantité d'eau est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes. L'opération du malaxage a été faite selon le tableau qui suit :

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Raclage de la cuve	
Durée des opérations		5 à 10 S	90 S	15 S	90 S
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

Tableau 4.1 : Conduite du malaxage selon la norme EN196-3[49].

5) Essai de prise :

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pate de consistance normale placé dans un moule tronconique.

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus au moins important est lié a plusieurs paramètres :

- La composition chimique du ciment.
- La finesse de mouture, le début de prise est plus rapide lorsque la finesse de mouture est grande.
- La présence d'une matière organique dans l'eau.
- L'excès de l'eau de gâchage qui agit comme retardateur.
- La température ambiante, la prise étant stoppée à 0 °C, et accélère lorsque la température dépasse 30 °C.

La composition chimique du ciment utilisé ; obtenue à l'aide des essais classiques ; les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Normes	Résultat	Unité
SiO ₂	NA 5042	20,90	%
Al ₂ O ₃		4,13	%
Fe ₂ O ₃		5,63	%
CaO		63,93	%
K ₂ O		0,61	%
Na ₂ O		0,08	%
Na ₂ O-Equ		0,48	%
Perte au feu 'PAF'	NA 5042	2,10	%
Teneur en oxyde de Magnésium(Mgo)		1,79	%
Teneur en anhydrite sulfurique (SO ₃)	NA 5042	2,24	%
Chlorure	NA 5042	0,026	%
Finesse Blaine (cm ² /g)	NA 231	3271	cm ² /g
Début du Temps de prise (min)	NA 230	165	min
Fin du Temps de prise (min)		220	min

Expansion "Le Chatelier" (mm)	NA 230	1	min
Masse volumique apparente		1180	kg/m ³
Masse volumique absolue		3130	kg/m ³

Tableau 4.2 : analyse Physico-chimiques du ciment CPA [57].

I. 2) Composition minéralogique :

Le calcul de la composition minéralogique du ciment est basé principalement sur les équations de bogue, donnant le pourcentage des principaux composés du ciment.

En se basant sur certaines hypothèses, Bogue a développé une méthode qui permet de connaître la composition potentielle en minéraux principaux C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF (composition minéralogique) d'un clinker ou d'un ciment à partir de sa composition chimique.

Les hypothèses de départ de Bogue sont les suivantes :

- * Toutes les réactions chimiques dans le four sont complétées.
- * Tout le fer se combine avec l'alumine pour former le C₄AF.
- * Toute l'alumine se combine avec la chaux et avec le fer pour former le C₃A et le C₄AF.
- * Toute la chaux se combine avec le fer, l'alumine et la silice pour former le C₄AF, le C₃A, le C₂S et le C₃S.
- * La chaux combinée est la différence entre la chaux totale et la chaux libre.
- * La substitution élémentaire dans les phases cristallines est négligée.
- * Tout le SO₃ provient du gypse.[58]

I. 3) Formules de bogue :

$$C_3S = 4,07 (Cao) - 7,6 (SiO_2) - 6,72 (Al_2O_3) - 1,43 (Fe_2O_3) - 2,85 (So_3).$$

$$C_2S = 2,87 (SiO_2) - 0,75 (C_3S).$$

$$C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3).$$

$$C_4AF = 3,04 (Fe_2O_3).$$

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	58.57	16.05	1.43	17.11

Tableau 4.3 : Composition minéralogique du ciment CPA selon Bogue [59]

II. Le sable :

a) Caractéristique physico-chimiques :

Les différents essais permettent d'identifier un sable, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable ; l'essai de bleu de méthylène et l'analyse chimique.

a-1) Granularité :

Selon la norme NF P 15-403 [60], les caractéristiques granulométrique s'intercale dans le fuseau normalisé.

a-2) Equivalent de sable :

Conformément à la norme NF P 18-598 [61], la valeur de ES doit être supérieure à 65 % .

a-3) Le module de finesse :

Il est égal au centième de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série : 0,16-0,315-1,25-2,5-5.

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé CECN EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 + 5g. sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure :

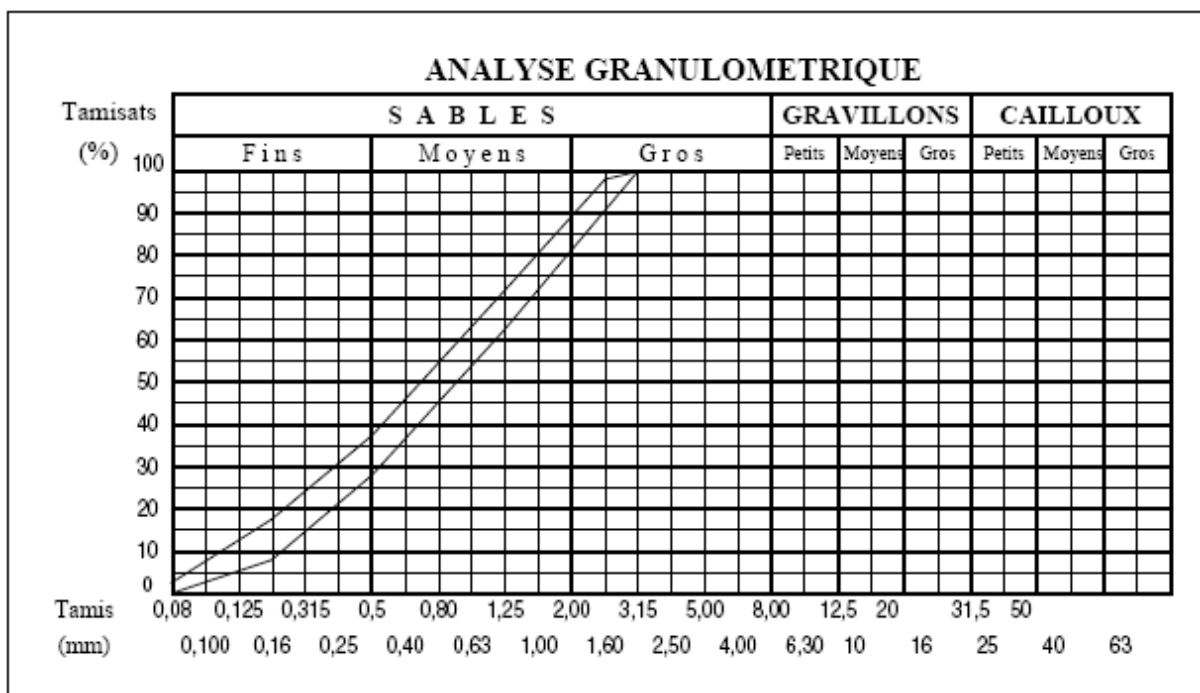


Figure 4.3 : Composition granulométrique du sable de référence CEN.

III. L'eau de gâchage :

L'eau potable est toujours utilisable pour gâcher le béton ou le mortier ;les autres eau nécessitent une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent.

Les chlorures en faible proportion peuvent modifier légèrement la prise et le durcissement du ciment, par contre la forte proportion peut réagir avec le ciment et compromettre la durabilité du béton, leurs effets sont néfastes sur les armatures dont la corrosion provoque l'éclatement du béton.

Selon la norme NF EN 206-1 (NF P 18-325) [62] la quantité maximale des ions chlores est fixée aux valeurs suivantes :

- ✓ 500 mg/l pour les bétons normés.
- ✓ 1000 mg/l pour les bétons armés.
- ✓ 500 mg/l pour les bétons précontraints.

La norme EN 206-1 stipule que :

- ✓ Les matériaux en suspension doivent être inférieurs à 4 ml/80ml d'eau pour le béton non armé.
- ✓ Les matériaux en suspension doivent être inférieurs à 0.5% .les micro-algues diminuent les résistances et ont un effet d'entraînement d'air diminuant la compacité.
- ✓ Les sulfates doivent être inférieurs à 2000 mg/l pour le béton non armé.ils réagissent sur le ciment pour former de l'ettringite qui s'accompagne de gonflement.
- ✓ Les nitrates doivent être inférieurs à 500 mg/l.
- ✓ Les sels de sodium (Na) et de potassium (K) doivent être inférieurs à 1500 mg/l (en cas de risque d'alcali réaction).Ils interviennent dans la rhéologie du béton, la prise du ciment et la durabilité du matériau durci.
- ✓ L'acidité en PH doit être supérieure à 4.

Le tableau qui suit représente la composition du l'eau de gâchage utilisé pour la confection des éprouvettes du mortier :

Composé	Symbole	Teneur (mg/l)
Chlorures	Cl	128
Sulfates	SO ₄	192.12
Magnésium	Mg	58
Calcium	Ca	88

Dioxyde de Carbone	CO ₂	2.31
Bicarbonates	CO ₃ H	137
Matières en suspension		0.29
Matières organiques		0.18
PH = 7.91		

Tableau 4.4 : Analyse chimique de l'eau de gâchage.[63]

IV.Pouzzolane naturelle :

La réglementation ASTM 618-71 [64] sur le ciment, indique qu'une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas ou peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former un ciment. [11]

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé à 2Km500 au sud de Beni saf. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant de rouge au noir.

IV.1) Composition chimique :

Selon la norme ASTM C-618 et après analyse on trouve la composition chimique suivante :

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	H ₂ O	CaCO ₃	Perte au feu
Teneur (%)	56.41	18.31	9.15	4.76	3.96	0.17	7.08	8.2	6.10

Tableau 4.5 : Composition chimique du pouzzolane.[57]

IV.2) Caractéristique physiques :

a)Finesse de la pouzzolane : (cm²/g)

Est caractérisée par la surface spécifique de Blaine, on utilisant le perméabilimètre selon la norme 196-6 [65].

b) La masse volumique absolue : (g/cm^3)

Est mesurée au densimètre le chatelier.

Le tableau qui suit résume ces caractéristiques :

Caractéristique	Valeur	Unité
Masse volumique absolue	2.60	g/cm^3
Surface spécifique Blaine	3710	cm^2/g

Tableau 4.6 : Caractéristique physiques de pouzzolane.

Un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

- ✓ Sa composition chimique vérifiée : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 83.87$
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ (ASTM C 618) (Condition vérifié)
- ✓ Son indice d'activité **I** est :

$$I = \frac{R}{R_{\text{référence}}}$$

$\xrightarrow{\text{Mortier : 75\% ciment, 25\% vase}}$
 $\xrightarrow{\text{Mortier 100\% ciment}}$

$$I = 0.84$$

$$0,67 < I < 1. \text{ (Condition vérifié)}$$

- ✓ Sa teneur en verre :

$$\text{Silice (\%)} - \text{Chaux (\%)} = 51.65 \%$$

$$> 34\% \text{ (Condition vérifié)}$$

V. La vase :

Toute la quantité de la vase utilisée est prélevée du barrage de Ferrgoug. Nous avons préparé une pouzzolane artificielle en suivant les étapes suivantes :

- Après séchage en étuve à 105°C les vases ont été broyées et tamisées par voie sèche. Les tamisât qui passent à $80\mu\text{m}$ sont récupérés pour la cuisson.

La calcination a été effectuée par petites quantités, en fonction de la capacité des fours disponibles (dans la cimenterie de Zahana).

- Les opérations de cuisson ont nécessité certaines précautions : pour éviter les chocs thermiques la vitesse de cuisson a été réglée à 7° par minute, la température de calcination 750°C, le maintient à une température constante pendant 1heure (A. Semcha 2003, 2006).
- Le produit ainsi obtenu (vase calcinée) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité.

V.1) Caractéristique de la vase avant calcination :

SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	Perte au feu %
39.25	5.38	11.62	17.32	2.17	0.50	19.52

Tableau 4.7 : Caractérisation chimique de la vase avant calcination.[57]

V.2) Caractéristique de la vase après calcination :

SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	Perte au feu %
54.40	4.96	10.80	17.64	1.21	0.15	18.91

Tableau 4.8 : Caractérisation chimique de la vase après calcination.[63]

Un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

- ✓ Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 70.16$
 $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$ (ASTM C 618) (Condition vérifié)
- ✓ Son indice d'activité **I** est :

$$I = \frac{R}{R_{référence}}$$

$R \rightarrow$ Mortier : 75% ciment, 25% vase
 $R_{référence} \rightarrow$ Mortier 100% ciment

I = 0.85 $0,67 < I < 1$. (Condition vérifié)

- ✓ Sa teneur en verre :

Silice (%) – Chaux (%) = 36,30 %

$> 34\%$ (Condition vérifié)

Le tableau qui suit résume les caractéristiques physiques de la vase :

Caractéristique	Valeur	Unité
Masse volumique absolue	2.43	g/cm ³
Surface spécifique Blaine	3520	cm ² /g

Tableau 4.9 : Caractéristique physiques de la vase.[66]

VI.Confection des éprouvettes de mortiers :

a) Descriptions des mélanges :

Les mortiers utilisés sont des mortiers ; conformément à la norme 196-1[42].

Les mélanges ont été préparé à partir du ciment CEM I 42.5 et trois combinaisons de liant obtenus suite a la substitution du ciment par différentes proportions de la pouzzolane naturelle (0, 10, 20,30) % en poids du ciment ; ensuite par différentes proportions de la vase (0, 10, 20,30) % en poids du ciment. Chaque mélange est constituer de :

- Liant : une partie (en poids) soit 450g.
- Sable : trois partie en poids soit 1350g.
- Eau : ½ partie (en poids) soit 225g.[69]

Chaque mélange permet de fabriquer simultanément trois éprouvettes (40x40x160) mm³ de mortier.

Nous avons opté pour la réalisation de trois mélanges de ciment et un des deux ajouts (vase calcinée, pouzzolane) avec un échantillon de ciment seul (voir tableau) :

N° de mélange	% du ciment	% d'ajout
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30

Tableau 4.10 : Composition des mélanges.

Le mortier normal est réaliser à l'aide d'un malaxeur HOBART, l'opération du malaxage est faite selon le tableau suivant :

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Duré des opérations			30 S	30 S	30 S	15 S	1 min 15 S	60 S

Etat malaxeur	du		Vitesse lente		Vitesse lente		Vitesse rapide
		Arrêt		Arrêt			

Tableau 4.11 : Opérations de malaxage du mortier normal. [66]



Figure 4.4 : Malaxeur normalisé.[36]

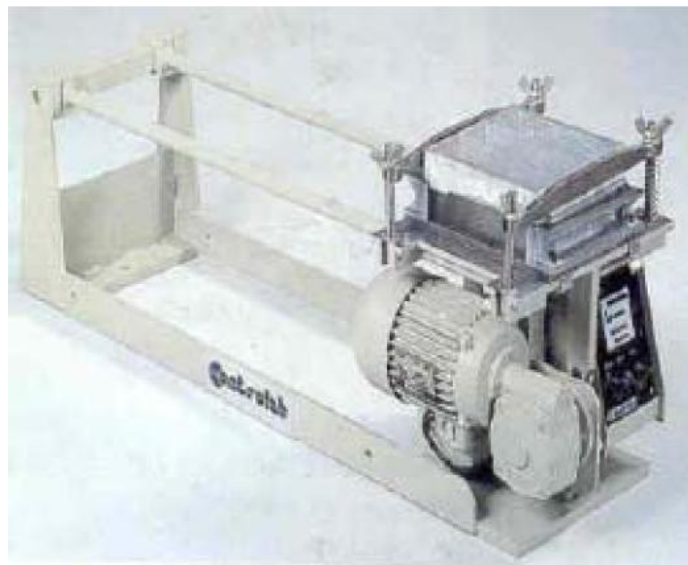


Figure 4.5 : Table à choques.[36]

Le tableaux qui suit donne les différents constituants de chaque mélange :

Notion	Sable(g)	Ciment (CPA)(g)		Pouzzolane Naturelle (g)		Vase Calciné(g)		Eau (cm ³)
		%	(g)	%	(g)	%	(g)	

MN	1350	100	450	0	0	-	-	225
P ₃₀	1350	70	315	30	135	-	-	225
P ₂₀	1350	80	360	20	90	-	-	225
P ₁₀	1350	90	405	10	45	-	-	225
MN	1350	100	450	-	-	0	0	225
V ₃₀	1350	70	315	-	-	30	135	225
V ₂₀	1350	80	360	-	-	20	90	225
V ₁₀	1350	90	405	-	-	10	45	225

Tableau 4.12 : Composition des différents mortiers.

b) L'ouvrabilité :

La maniabilité du mortier dépend de :

- La granulométrie et du rapport eau/ciment, en particulier, plus le rapport eau/ciment est élevé, plus la granulométrie ne doit être fine pour obtenir une grande maniabilité.
- Du temps et des conditions d'humidité des granulats.
- De même qu'une quantité de l'eau peut être perdue par évaporation, notamment si le béton ou le mortier sont exposés au soleil, au vent ou si une partie de l'eau est utilisée par les réactions chimiques initiales du ciment.
- De la température ; pour un béton ou un mortier fabriqué, lorsque la température est élevée, la teneur en eau doit être augmentée si on veut maintenir la maniabilité initiale constante.
- L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) La table à secousses: le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

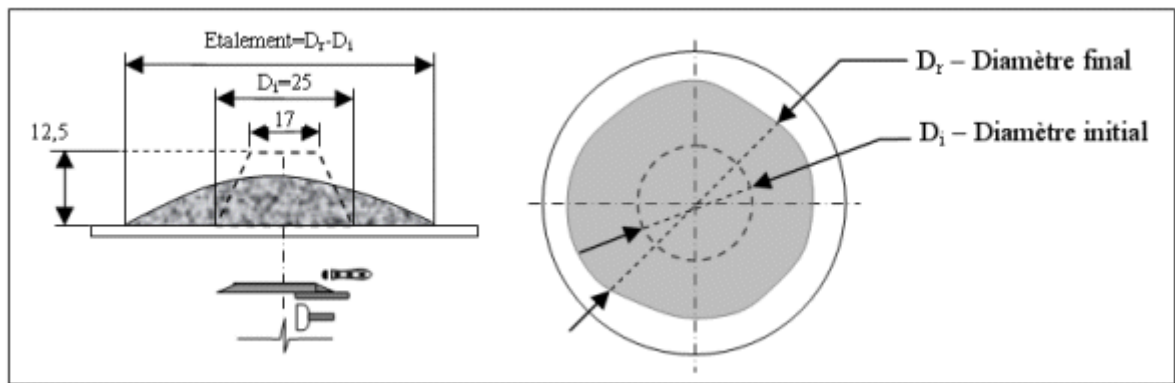


Figure 4.6 : Table à secousses.[36]

b) Le maniabilimètre du LCPC: il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.[06]

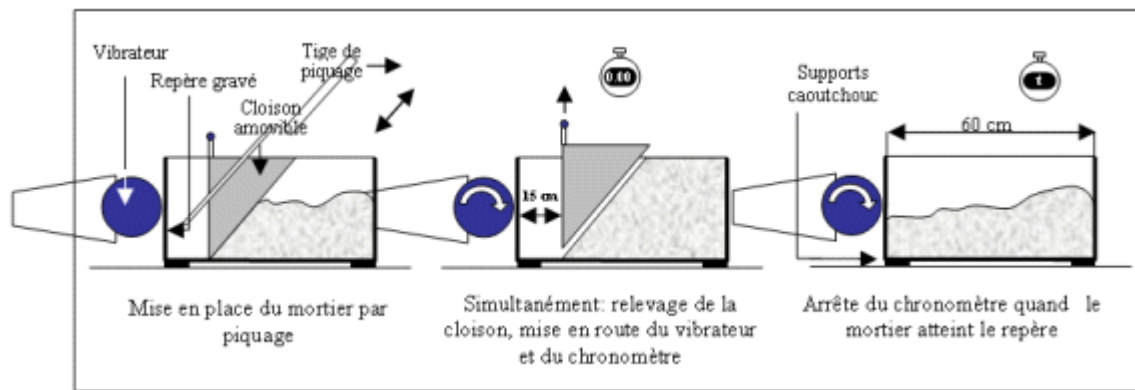


Figure 4.7 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre.[64]

- c) Le cône: dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.[06]

Dans notre cas on a utilisé la table à secousse, la maniabilité est mesurée grâce à la table d'étalement, conformément à la norme ASTM C 1437 [67] ; et on a obtenue les résultats suivants :

Désignation des mortiers	Pouzzolane naturelle (%)	Vase (%)	E/L	Etalement (cm)	Etalement (%)
MN	0	0	0,5	11,33	18
P10	10	0	0,5	10,9	17
P20	20	0	0,5	10,73	17,1
P30	30	0	0,5	10,45	16,7
V10	0	10	0,5	11,25	18
V20	0	20	0,5	11,37	18,1
V30	0	30	0,5	11,42	18,2

Tableau 4.13 : Résultats de la maniabilité des différents mortiers confectionnés.

On a gardé la même rapport (E/C) pour voir l'effet des ajouts (pouzzolane ; vase) sur le comportement du mortier.

Les résultats du tableau 4.13 montrent qu'avec une quantité constante (E/L =0.5) pour la préparation de tous les mortiers, le mortier de contrôle présente une maniabilité :

- ✓ Légèrement supérieure à celle des mortiers avec ajout de pouzzolane naturelle et des mortiers ternaires et égale à celle du mortier V10.
- ✓ Légèrement inférieure à celle avec ajout de vase V20 et V30.

La maniabilité pour les mortiers avec additions est sensiblement identique à celle du mortier témoin.

Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau jusqu'au jour d'écrasement :



Figure 4.8 : éprouvette du mortier.

c) Résistances mécaniques :

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment;
- rapport C/E;

- granulométrie et nature du sable;
- énergie de malaxage et mise en œuvre;
- protection les tous premiers jours.

Des essais mécaniques de résistances (flexion et compression) ; les échéances d'essais sont à 1, 3, 7, 14, 21, 28 jours. Les éprouvettes 4x4x16 cm sont testées en flexion et en compression selon la norme (NF EN 196-1). Chaque éprouvette donne un résultat de flexion et deux de compression.

1. La résistance à la traction :

La mesure de la résistance à la traction par flexion est effectuée sur une machine pourvu d'un dispositif de flexion par trois points tels que schématisés sur les figures.

La résistance est calculée selon la formule :

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3$$

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

$$R_f \text{ (MPa)} = 2,34 \times 10^{-3} F_f \text{ (N)}$$

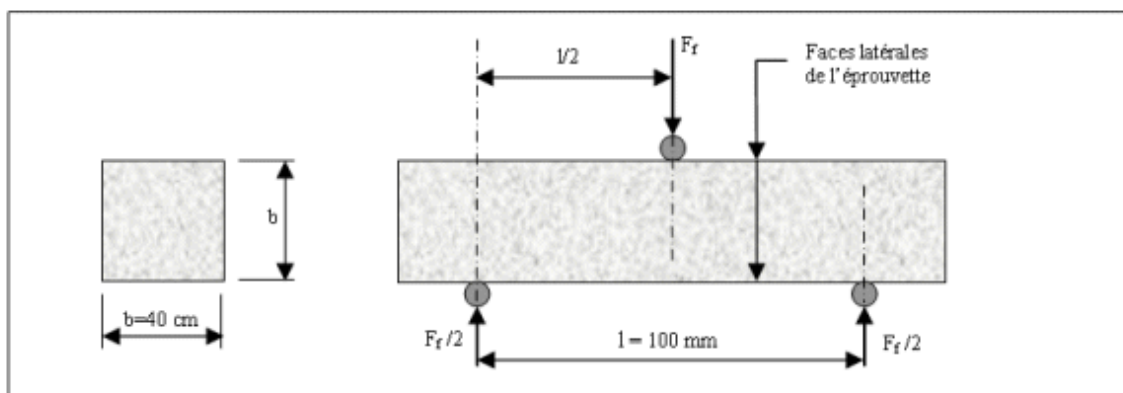


Figure 4.9 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.[64]



Figure 4.10 : Machine de la traction par flexion.[36]

Les résultats obtenus sont sur le tableau qui suit tel que (MN) indique le mortier normal ; (p) indique la pouzzolane et (V) indique la vase :

Résistance à la traction par flexion (Mpa)												
Age (jours)	1		3		7		14		21		28	
Pourcentage d'ajout (%)												
	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V
0%	4,1	4,1	5,06	5,06	7,11	7,11	7,73	7,73	8,12	8,12	8,97	8,97
10%	3,28	3,65	4,45	4,56	6,14	6,29	6,89	7,1	7,52	7,4	8,4	8,73
20%	2,73	2,93	3,85	3,73	5,56	5,61	6,2	6,41	6,79	6,39	7,89	7,93
30%	2,13	2,49	3,32	3,41	4,78	4,89	5,54	5,71	6,13	6,35	7,12	7,27

Tableau 4.14 : Résultat de la résistance de la traction par flexion.

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution et l'effet de la pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers contenant différents âges : 1 – 3 – 7 -14 -21 -28. D'eux on peut signaler les remarques suivantes :

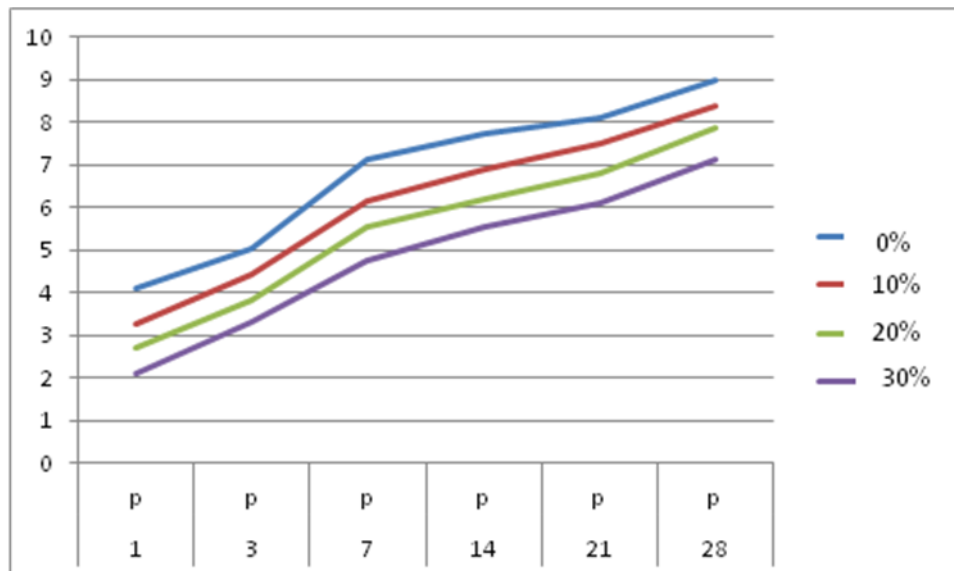


Figure 4.11 :Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant de la pouzzolane.

- ✓ Les résistances augmentent en fonction de l'âge et on ne remarque aucune chute de résistance.
- ✓ Les mortiers avec ajout développent des résistances qui restent inférieures à celle du mortier contrôle presque à tout les âges (1, 3, 7, 14, 21,28) jours.
- ✓ A 1 jour, la résistance est de 4.1 pour le mortier de référence, 3.28 pour P10, 2.73 pour P 20 et 2.13 pour P30.
- ✓ A 3 jours, la résistance est de 5.06 pour le mortier de référence, 4.45 pour P10, 3.85 pour P 20 et 3.32 pour P30.
- ✓ A 7 jours, la résistance est de 7.11 pour le mortier de référence, 6.14 pour P10, 5.56 pour P 20 et 4.78 pour P30.
- ✓ A 21 jours, la résistance est de 8.11 pour le mortier de référence, 7.52 pour P10, 6.79 pour P 20 et 6.13 pour P30.
- ✓ A 28 jours, la résistance est de 8.97 pour le mortier de référence, 8.4 pour P10, 7.89 pour P 20 et 7.12 pour P30.
- ✓ Les figures ci-dessous illustrent l'évolution et l'effet de la vase sur la résistance à la flexion des mortiers contenant différents âges : 1 - 3 - 7 -14 -21 - 28.D'eux on peut signaler les remarques suivantes :

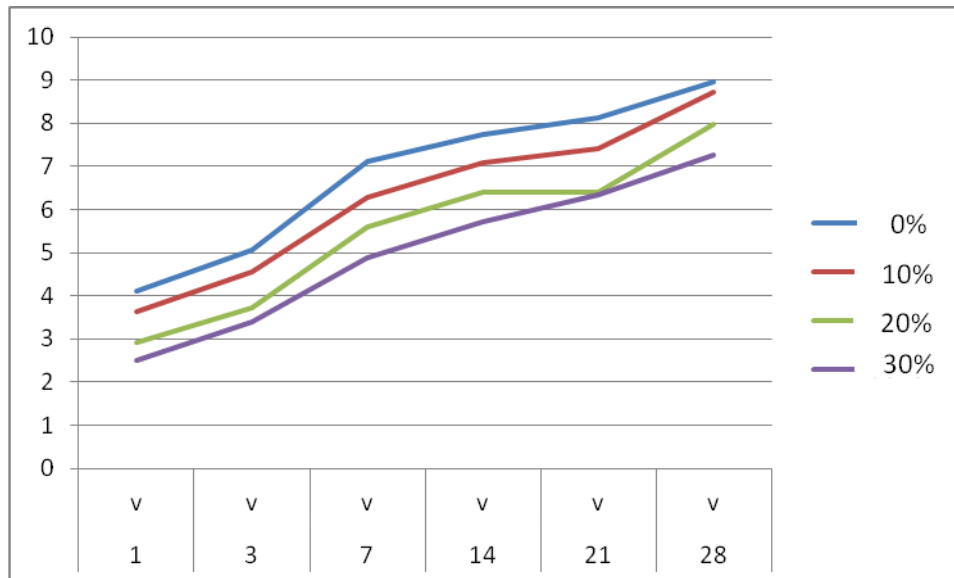


Figure 4.12 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant de la vase.

- ✓ Les résistances augmentent en fonction de l'âge et on ne remarque aucune chute de résistance.
- ✓ Les mortiers avec ajout développent des résistances qui restent inférieures à celle du mortier contrôle presque à tout les âges (1, 3, 7, 14, 21, 28) jours.
- ✓ A 1 jour, la résistance est de 4.1 pour le mortier de référence, 3.65 pour V10, 2.93 pour V20 et 2.49 pour V30.
- ✓ A 3 jours, la résistance est de 5.06 pour le mortier de référence, 4.56 pour V10, 3.73 pour P 20 et 3.41 pour V30.
- ✓ A 14 jours, la résistance est de 7.73 pour le mortier de référence, 7.1 pour V10, 6.41 pour V20 et 5.71 pour V30.
- ✓ A 21 jours, la résistance est de 8.11 pour le mortier de référence, 7.4 pour V10, 6.39 pour V20 et 6.35 pour V30.
- ✓ A 28 jours, la résistance est de 8.97 pour le mortier de référence, 8.73 pour V10, 7.93 pour V20 et 7.27 pour V30.

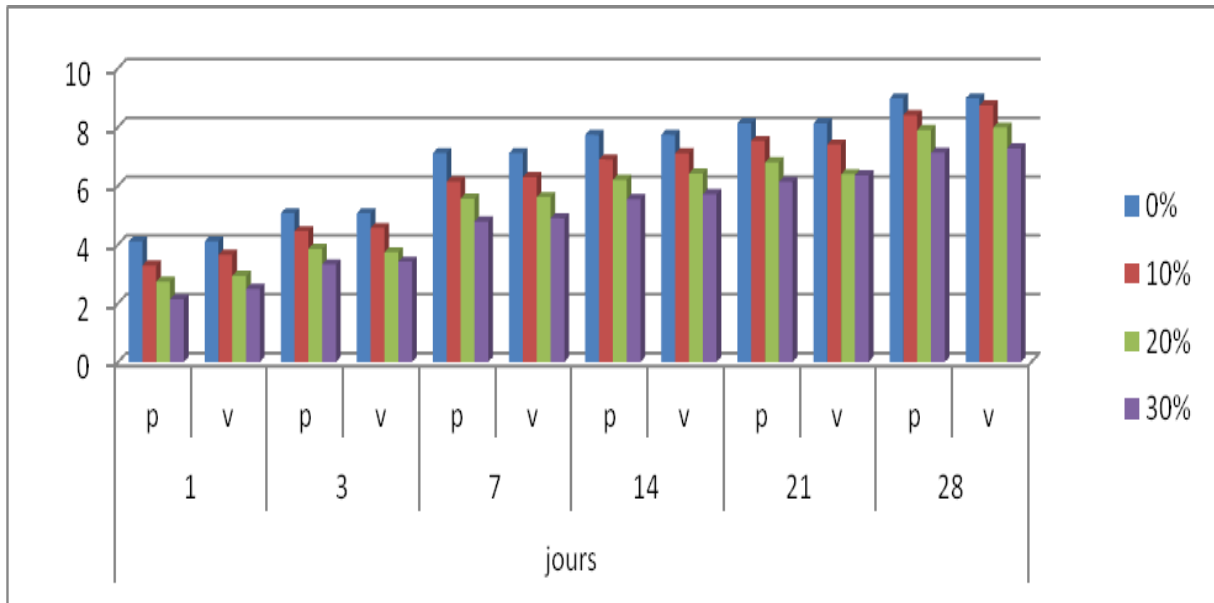


Figure 4 .13 : Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers avec les ajouts

(P et V) en fonction de l'âge.

- ✓ Tout les mortiers développent des résistances qui restent inférieures du mortier contrôle à tout les âges.
- ✓ L'augmentation du taux de pouzzolane et de la vase affecte négativement sur la résistance du mortier.

2. La résistance à la compression :

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

$$R_c = F_c / b^2$$

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

$$R_c (\text{MPa}) = F_c (\text{N}) / 1600$$

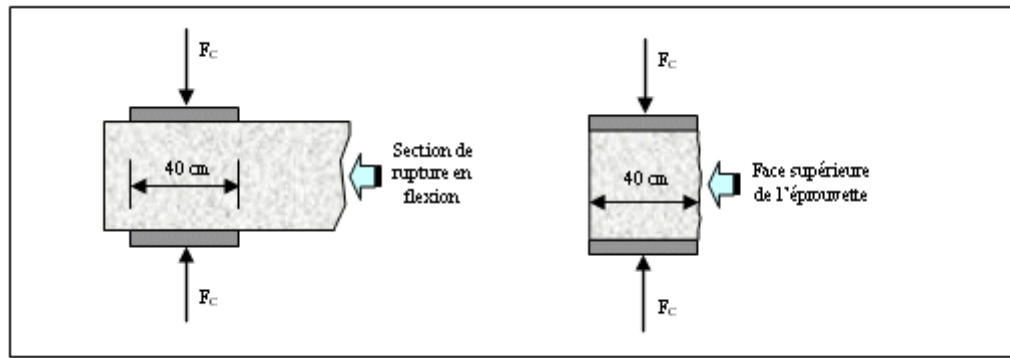


Figure 4.14 : Dispositif de rupture en compression.[64]

Résistance à la compression (Mpa)												
Age (jours)	1		3		7		14		21		28	
Pourcentage d'ajout (%)												
	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V
0%	2,31	2,31	13,2	13,2	24,6	24,6	29,4	29,4	35,9	35,9	41,3	41,3
10%	2,10	2,20	10,1	11,2	17,9	18,9	24,8	25,9	32,8	34,7	41,0	41,2
20%	1,80	1,95	6,70	8,90	14,3	16,5	19,8	22,4	27,6	27,4	38,6	37,5
30%	1,60	1,75	4,95	6,11	12,7	12,8	17,5	17,4	25,4	24,7	36,4	35,2

Tableau 4.15 : Résultat de la résistance à la compression des mortiers.

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution et l'effet de la pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers contenant différents âges : 1 – 3 – 7 -14 -21 -28.D'eux on peut signaler les remarques suivantes :

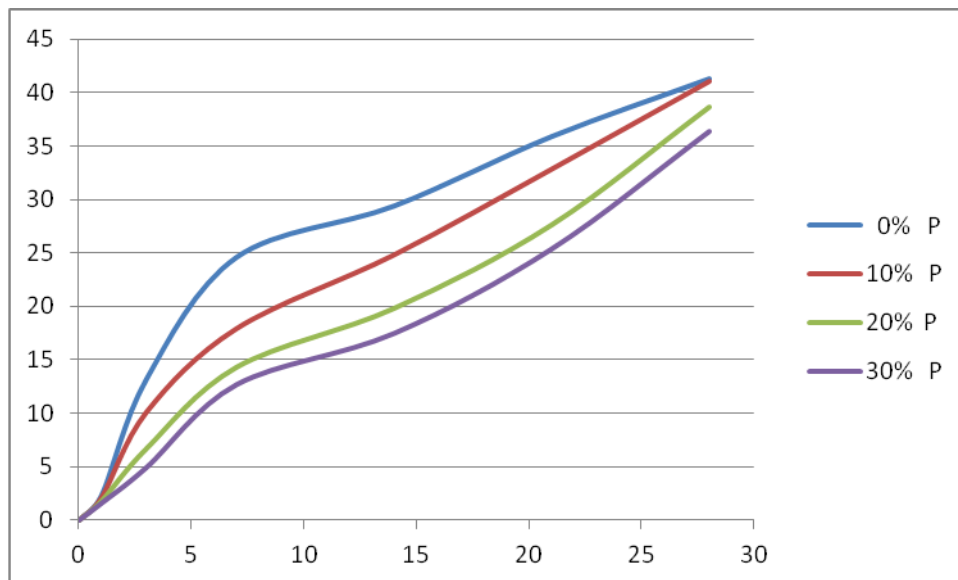


Figure 4 .15 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la pouzzolane.

- ✓ Les résistances augmentent en fonction de l'âge et on ne remarque aucune chute de résistance.
- ✓ Les mortiers avec ajout développent des résistances qui restent inférieures à celle du mortier contrôle presque à tout les âges (1, 3, 7, 14, 21,28) jours ; et on remarque qu'à 28 jours les résistances à la compression du mortier contenant 10 % de la pouzzolane et le mortier de contrôle se rapproche ; ils sont presque égaux.
- ✓ A 3 jours, la résistance à la compression est de 13.2 pour le mortier de référence, 10.1 pour P10, 6.70 pour P 20 et 4.95 pour P30.
- ✓ A 7 jours, la résistance à la compression est de 24.6 pour le mortier de référence, 17.90 pour P10, 14.30 pour P 20 et 12.70 pour P30.
- ✓ A 28 jours, la résistance à la compression est de 41.3 pour le mortier de référence, 41 pour P10, 38.6 pour P 20 et 36.4 pour P30.

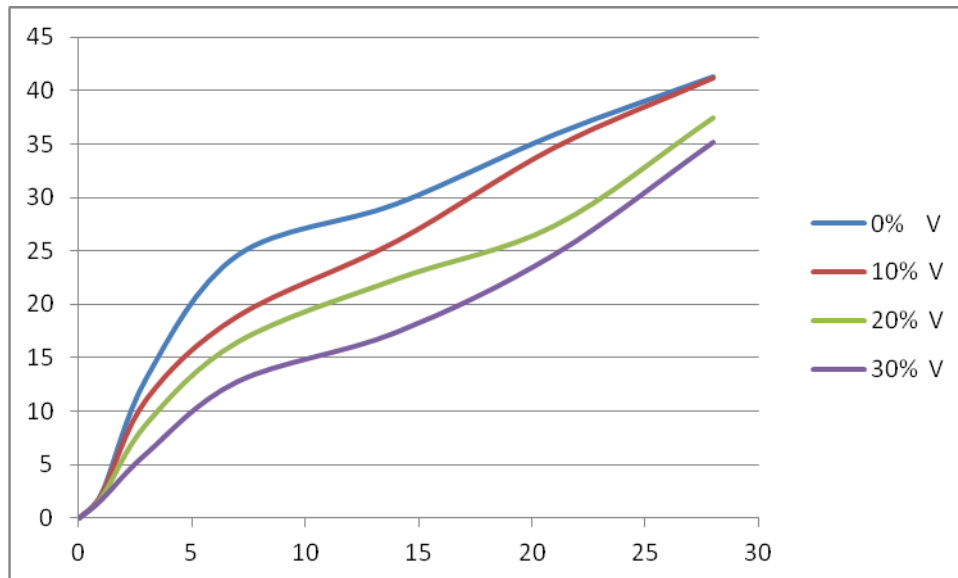


Figure 4 .16 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant de la vase.

- ✓ Les résistances augmentent en fonction de l'âge et on ne remarque aucune chute de résistance.
- ✓ Ces mortiers développent des résistances qui restent inférieures à celle du mortier contrôle presque à tout les âges (1, 3, 7, 14, 21,28) jours.
- ✓ A 1 jour, la résistance à la compression est de 2.31 pour le mortier de référence, 2.20 pour V10, 1.95 pour V20 et 1.75 pour V30.
- ✓ A 7 jours, la résistance à la compression est de 24.6 pour le mortier de référence, 18.9 pour V10, 16.5 pour P 20 et 12.8 pour V30.
- ✓ A 14 jours, la résistance à la compression est de 29.4 pour le mortier de référence, 25.9 pour V10, 22.4 pour V20 et 17.4 pour V30.
- ✓ A 28 jours, la résistance est de 41.3 pour le mortier de référence, 41.2 pour V10, 37.5 pour V20 et 35.2 pour V30.

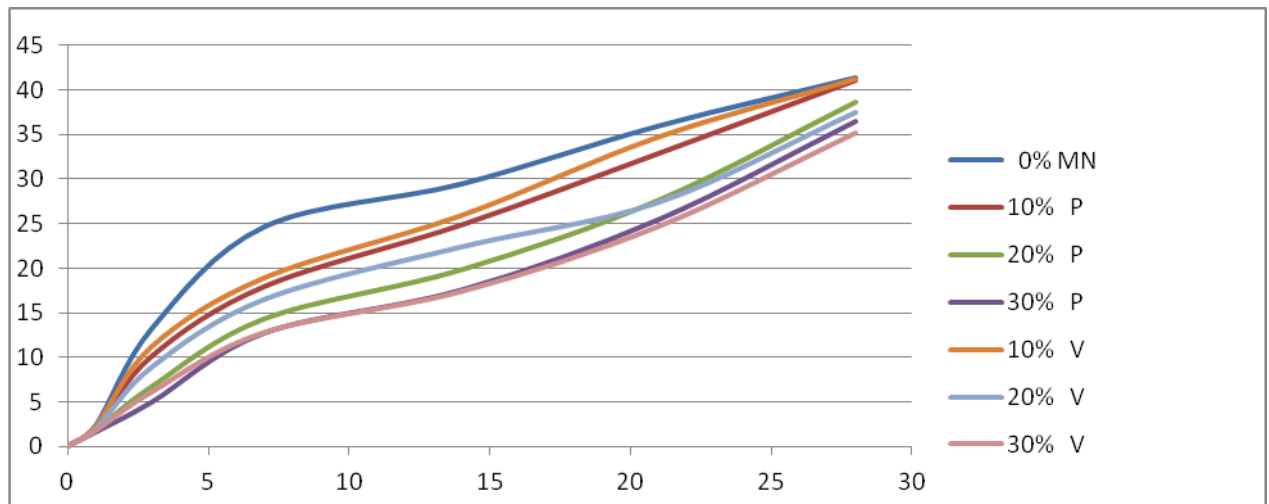


Figure 4 .17 : Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers avec les ajouts

(P et V) en fonction de l'âge.

On comparant les résultats de la résistance à la compression pour les mortiers contenant une substitution de la vase et les mortiers contenant une substitution de la pouzzolane on tire le résultat suivant :

- ✓ La résistance à la compression des mortiers contenant de la vase est presque égale à celle des mortiers contenant de la pouzzolane et ça au jeune âge (1,3) jours .
- ✓ Cette résistance est devenue comparable entre 3 jours et 21 jours, on remarque que la résistance du mortier contenant de la vase est supérieure à celle contenant de la pouzzolane et ça pour tout les pourcentage d'ajouts (10% , 20% , 30%).
- ✓ A l'âge de 28 jours, on remarque que les résultats de la résistance à la compression du mortier qui contient 10% de la vase ainsi que le mortier qui contient 10% de la pouzzolane se rapproche vers la résistance à la compression du mortier de contrôle .

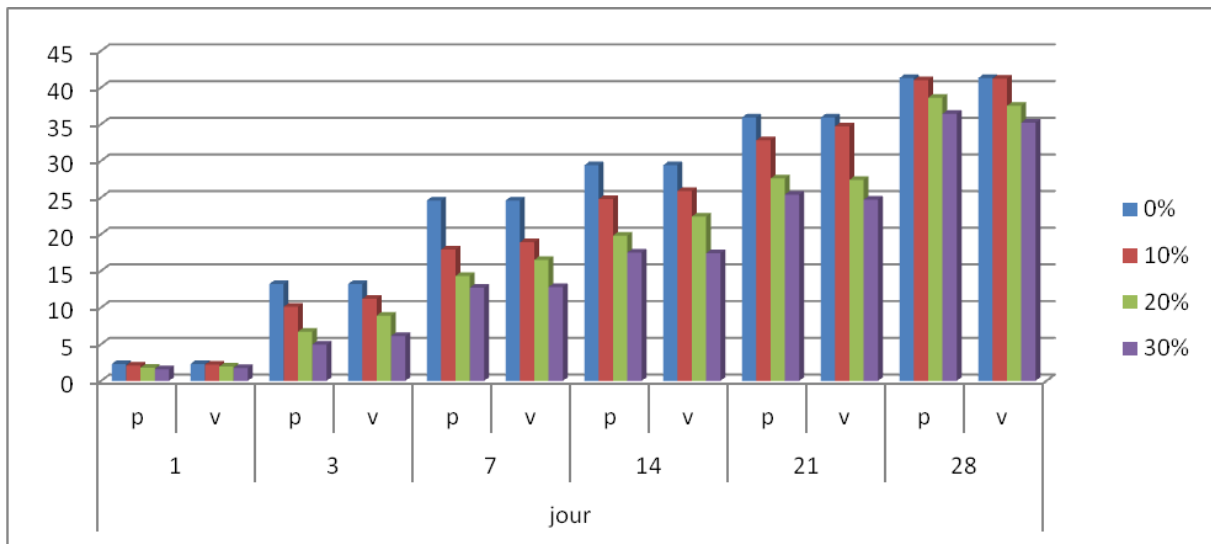


Figure 4 .18 : Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers avec les ajouts (P et V) en fonction de l'âge.

On remarque que la résistance à la compression des mortiers augmente en fonction de l'âge pour tous les types mortiers.

A 28 jours, on constate que la différence entre la résistance à la compression entre le mortier de contrôle et les mortiers contenant une substitution de 10% de la vase ou de la pouzzolane est négligeable.

III). Détermination de la chaleur d'hydratation :

➤ Mode opératoire :

La température de la salle d'essais est fixée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Au voisinage des calorimètres, la

température ambiante doit être comprise entre 19 et 21°C et rester stable à $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

La mesure de la température du calorimètre de référence doit être utilisée pour contrôler la

température ambiante.

La vitesse de l'air de ventilation au voisinage des calorimètres doit être inférieure à 0.5 m.s^{-1} .

Les sources de chaleurs et orifices de ventilation doivent être éloignés des calorimètres.

Pour effectuer l'essai il faut :

- un calorimètre destiné à recevoir l'éprouvette de mortier,
- un calorimètre de référence contenant une éprouvette de mortier gâchée depuis au moins trois mois (considérée inerte),
- une boîte à mortier,
- deux thermomètres ou un enregistreur de température,

- un malaxeur (conforme à la norme NF P 15 – 411).

➤ Fabrication du mortier normal :

a) Composition :

- sable CEN 1350 g.

- ciment 450 g.

- eau 225 g.

Mélanger d'abord eau et ciment durant 30 s à 140 t/min, ajouter le sable rapidement et malaxer durant 60 s à 280 t/min.

➤ Mesure de la chaleur d'hydratation :

Aussitôt après la fabrication du mortier

- peser la boîte vide

- mettre le mortier dans la boîte et peser le tout

- installer la sonde de température

- fermer le calorimètre

- mettre en fonction l'acquisiteur de données (mesure du temps et de la température de référence et des températures des calorimètres)

➤ Calcul de la chaleur d'hydratation :

La chaleur d'hydratation q à l'instant t s'écrit (1er terme : chaleur accumulée, 2ème terme: perte de chaleur vers l'extérieur):

$$Q = \frac{C}{Mc} \theta + \frac{1}{Mc} \int_0^t \alpha \cdot \theta \cdot dt$$

avec : $C = 0.75(m_c + m_s) + 3.76 \times m_e + 1.3 \times m_b + \mu$

: $\alpha = a + b \cdot \theta$

m_c, m_s, m_e, m_b : masse de ciment, sable, eau dans l'éprouvette et de la boîte [g]

t : durée d'hydratation [h]

C : capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette [J °C-1]

α : coefficient de déperdition thermique du calorimètre [J h-1 °C-1]

θ : échauffement de l'éprouvette à l'instant t (différence entre la température de l'éprouvette et la référence) [°C]

μ : capacité thermique du calorimètre vide [J °C-1]

a, b : paramètre spécifique d'étalonnage du calorimètre

Le calcul est réalisé par pas successif sur toute la période de mesure. Pour chacun des pas, on connaît le temps t_i et l'échauffement θ_i . Ceci permet de calculer les valeurs suivantes:

- Chaleur dans le calorimètre : $A = \frac{C}{mc} \theta_i$
- Echauffement moyen : $\theta_{i,moy} = \frac{\theta_i + \theta_{(i-1)}}{2}$
- Coeff. de déperdition moyen : $\alpha_{i,moy} = a + b \cdot \theta_{i,moy}$
- Perte de la chaleur : $B = \frac{1}{Mc} \sum \alpha_{i,moy} \cdot \theta_{i,moy} \cdot \Delta t_i$
- Chaleur d'hydratation au temps t : $Q = A+B$ [48]

Résultats :

Température du gâché : 20,1°C

Caractéristique du calorimètre :

$$X(\text{J.h-1.}^\circ\text{C}) = 63.0 + 0.216 \quad u = 384 \text{ J. }^\circ\text{C-1}$$

Capacité thermiques du calorimètre :

$$C = 0.75 (350 + 1050) + (3.76 \times 175) + (0.50 \times 138) + 384 = 2161 \text{ J. }^\circ\text{C-1}$$

$$\frac{C}{Mc} = \frac{2161}{350} = 6.17 \text{ J.}^\circ\text{C-1.g-1}$$

Le tableau qui suit présente les résultats de la chaleur d'hydratation en fonction de l'âge :

Age t(h)	Echauffement (°C)	Chaleur d'hydratation (J.g-1)
0,5	1,7	11
1	1,9	12
2	2,3	15
4	4,1	27
6	7,9	53
8	12,9	88
10	17,3	120
12	21,3	153
14	25,4	187
16	27,4	210
18	28	224
20	27,9	235
22	27,5	243
24	27	251
28	25,4	261
32	23,6	269
36	21,7	275
40	19,8	280
44	18,1	284
48	16,5	287
54	14,3	291
60	12,3	293
66	10,7	297
72	9,3	299
78	8	301
84	7,1	303
90	6,2	305
96	5,4	307
102	4,7	308
108	4,1	309
114	3,7	311
120	3,3	312

Tableau 4.16 : évaluation de la chaleur d'hydratation du mortier (MN) en fonction de l'âge. [68]

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution de la chaleur d'hydratation du mortier contenant seulement CPA en fonction de l'âge :

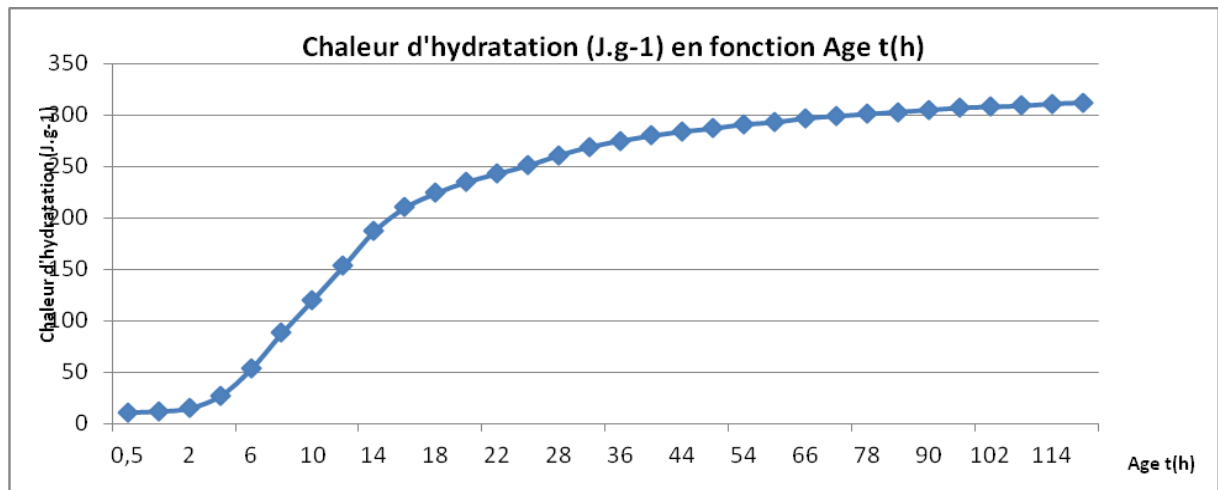


Figure 4.19 : évaluation de la chaleur d'hydratation du mortier (MN) en fonction du temps.

On examinant le graphe on peut tirer les résultats suivants :

- ✓ On remarque que la chaleur d'hydratation augmente en fonction du l'âge et elle ne présente aucune chute.
- ✓ Le dégagement de la chaleur d'hydratation commence des le gâchage, il atteint la valeur de 11 (J.g-1) à 0,5 h.
- ✓ La chaleur d'hydratation à l'âge compris entre 2h et 16h augmente rapidement ;donc il y a dégagement d'une quantité significative de chaleur d'hydratation.
- ✓ A partir de 20h on remarque une diminution du dégagement de la chaleur d'hydratation, il de devient presque constant

Age t(h)	Echauffement (°C)	Chaleur d'hydratation (J.g-1)
0,5	1,7	10
1	1,9	11

2	2,3	14,5
4	4,1	26
6	7,9	52
8	12,9	86
10	17,3	118
12	21,3	152
14	25,4	185
16	27,4	209
18	28	222
20	27,9	232
22	27,5	241
24	27	249
28	25,4	259
32	23,6	266
36	21,7	271
40	19,8	278
44	18,1	281
48	16,5	284
54	14,3	288
60	12,3	291
66	10,7	294
72	9,3	296
78	8	298
84	7,1	300
90	6,2	301
96	5,4	304
102	4,7	305
108	4,1	306
114	3,7	309
120	3,3	310

Tableau 4.17 : évaluation de la chaleur d’hydratation du mortier contenant de la pouzzolane (P20) en fonction de l’âge. [68]

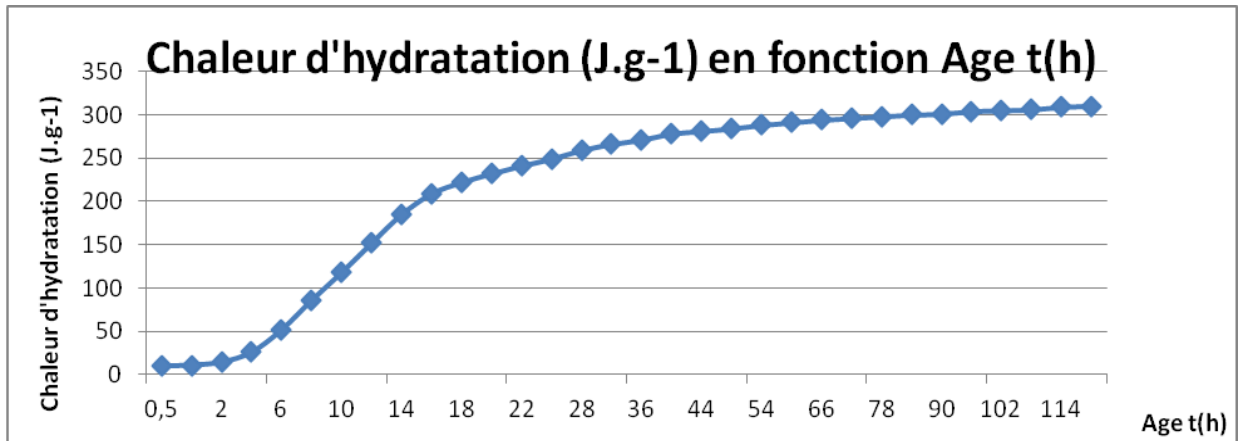


Figure 4.20 : évaluation de la chaleur d'hydratation du mortier avec ajout (20 %) (P) en fonction du temps.

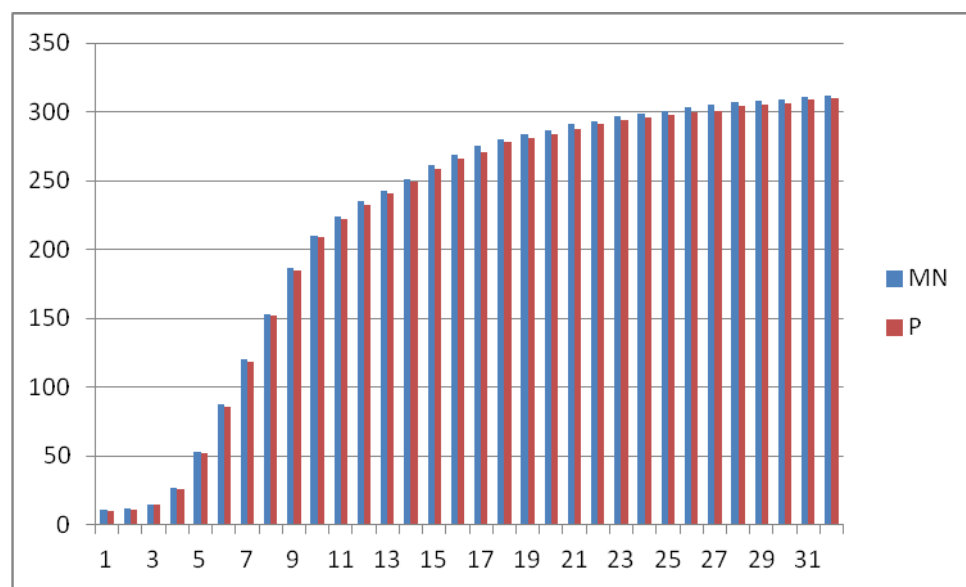


Figure 4.21 : Evolution de la chaleur d'hydratation du mortier normal (MN) et avec ajout (P) en fonction de l'âge.

On examinant le graphe on peut tirer les résultats suivants :

- ✓ La chaleur d'hydratation du mortier de contrôle et celle contenant de la pouzzolane (P20) évolue avec le temps, et elle tend ver a stabiliser vers 20 h.
- ✓ La chaleur d'hydratation du mortier contenant de la pouzzolane est moindre que celle du mortier de contrôle.

Conclusion :

La pouzzolane artificielle (à base de la vase calcinée du barrage de Fergoug) peut être considérée comme matériaux pouzzolaniques puisqu'elle vérifie :

- $AL_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 72.95 \%$
- I vase calcinée = 0.85
- Silice (%) – Chaux (%) = 36.30%

L'analyse des différents graphes (figures) permet d'apporter les commentaires suivants :

- ✓ Les résistances à la traction par flexion ou de compression de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge.
- ✓ La résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la pouzzolane ou la vase diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout que se soit pouzzolane ou vase et cela pour tous les âges ;et surtout à 2j, 7j et 28 jours .
- ✓ On remarque que la diminution de la résistance en fonction de pourcentage d'ajout est presque constante que se soit l'ajout (pouzzolane ou vase)
- ✓ La résistance à la traction par flexion du mortier contrôle et les mortiers avec ajout tend ver à s'approcher à l'âge de 28 jour surtout pour les mortiers contenant 10% de la vase ou de la pouzzolane.

Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et artificielle et le $Ca(OH)_2$ libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle et artificielle la propriété de fixer la chaux.

La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

- ✓ L'effet de la pouzzolane donne lieu à une consommation de la chaux, alors que l'hydratation constitue une réaction donnant lieu à une production de la chaux.
- ✓ La chaleur d'hydratation et la résistance mécanique des mortiers contenant de la pouzzolane est légèrement faible au mortier de contrôle, cela à cause de C3S qui se présente dans le ciment portland.

Conclusion générale

Le secteur cimentaire en Algérie commence à utiliser certaines substances minérales telles que la pouzzolane naturelle de Bénie – Saf à des taux très faibles à cause d'une crainte accrue des constructeurs d'utiliser un matériau mal connu et pas encore maîtrisé. Notre étude a été menée pour évaluer l'effet de l'intégration de la pouzzolane naturelle et de la pouzzolane artificiel (la vase calciné) dans le mortier ; l'exploitation des résultats a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✓ Possibilité d'exploitation, des gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane de Beni-saf avec des proportions étudiées.
- ✓ Possibilité de la valorisation de la vase dans l'industrie cimentaire, et la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO_2 , l'accroissement de la production, la préservation de certaines ressources sont des avantages économiques et écologiques de l'introduction des ajouts minéraux.

- ✓ Les résistances à la traction par flexion ou de compression de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge.
- ✓ La résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la pouzzolane ou la vase diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout que se soit pouzzolane ou vase et cela pour tous les âges ;et surtout à 2j, 7j et 28 jours .
- ✓ La pouzzolane artificielle (à base de la vase calcinée du barrage de Fergoug) peut être considérée comme matériaux Pouzzolanique.
- ✓ L'effet de la pouzzolane donne lieu à une consommation de la chaux, alors que l'hydratation constitue une réaction donnant lieu à une production de la chaux.
- ✓ Le rapport de Cao à Sio₂ dans le CSH que contient un mélange d ciment portland pouzzolane hydraté est légèrement inférieur au CSH présent dans les ciment portland hydratés,ce qui contribuer en partie à la résistance chimique supérieure que présente le mélange de ciment portland-pouzzolane hydraté.
- ✓ La chaleur d'hydratation et la résistance mécanique des mortiers contenant de la pouzzolane est légèrement faible au mortier de contrôle, cela à cause de C₃S qui se présente dans le ciment portland.

Perspectives

A travers cette étude (résultats expérimentaux et conclusion générales), on peut énumérer quelques perspectives pour des futurs travaux de recherche :

- ✓ Etudier les propriétés thermiques des liants hydrauliques à long terme.
- ✓ Etudier l'effet des deux ajouts minéraux (pouzzolane et vase) et essayer de trouver des proportions adéquats pour pouvoir les valoriser ces déchets naturels et préserver l'environnement.
- ✓ Etudier l'effet de l'utilisation de la vase dans les mortiers à différentes proportions et voir la différence entre elle et la pouzzolane.
- ✓ Appliquer les résultats trouvés dans les industries cimentaires en but de réduire la consommation d'énergie et des émissions de CO₂.
- ✓ L'utilisation de la pouzzolane dans les ouvrages de grandes masses tel que les barrages et cela grâce à ses propriétés de réduire la chaleur d'hydratation et par suite l'élimination ou la réduction des fissurations.

- ✓ Approfondir les recherches sur la valorisation de la vase en but de préserver notre environnement et augmenter la capacité des barrages et surtout après les opérations de dragages.
- ✓ Développer l'utilisation de la vase et de la pouzzolane non seulement dans les mortiers mais aussi dans les nouveaux bétons (BAP....)

Références bibliographiques

- [01] JEFFREY S. RUSSELL « Perspectives in civil engineering »
- [2] JOHN NEWMAN « Advanced concrete technology/constituent materials »;
Department of Civil Engineering - Imperial College – London; 2003.
- [03] MEMOIRE BEN GHAZY ZIED : « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique » ; thèse de magister ,université de Msila 2007/2008.
- [4] BOUGLADA MOHAMED SALAH « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier » ; thèse de magister, université de Msila 2007/2008.
- [05] DAVID GONZALEZ « Durabilité des assemblages colles du génie civil :effets du vieillissement hygrothermique aux échelles micro- et macroscopiques »
- [06] COURS EN LIGNE, Matériaux de construction, Les ciments, Chapitre 2,
Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org/>> ,
- [07] RACHIDA IDIR « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique » juillet 2009

- [08] J. BROCARD, « Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment », Tome I, Librairie Aristide Quillet, 1972, P 813,815.
- [09] J. BARON, J.P. OLLIVIER et J.C. WEISS, « Les bétons, bases et données pour leur Formulation », Edition Eyrolles, Troisième tirage, 1999, P 3-12.
- [10].ITALCEMENTI GROUP, Ciments Calcia, disponible sur site web <<http://www.ciments-calcia.fr/pro/pdf/labelhrc.pdf>>.
- [11] CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base d'argile gréseuse et vaseuse sur les propriétés des matériaux cimentaire »
- [12] M.MOULI, F.BENAICHE « Pouzzolane de Béni saf : Bilan de quelques études » colloques méditerranéen sur les matériaux, ENSET Oran.
- [13] GROUPE CIMENTS LUXEMBOURGEOIS, Séminaire – BETON 2001: Journée d'information technique 23 novembre 2001 Carlo KIRPACH.
- [14] « Les composants de la matrice cimentaire » rappels et interaction ; société de l'industrie minéral ; 17 rue saint sevenir-75015-Paris.
- [15] G. DREUX, « Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles ,2ème édition, 1979.17.
- [16] NORMAN F. MAC LEOD « l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage » ; . (cement association of canada)Mars 2005 page 10-12
- [17] PIERRE-CLAUDE AITCINE, Béton de haute performance, Edition Eyrolles.
- [18] « The cement association of canada, les ciments avec ajouts » disponible sur site web <<http://www.cement.ca/cement.nsf>>
- [19] TRIC BEDARD « Influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton »
- [20] Société des ciments de Ain-El-Kebira, « Chimie des ciments 2 ».
- [21] GARDNER, E.M., GAIDIS, W.R « Hydration mechanisms I» Materials Science of Concrete, Edited by Skalny ; pp. 95-125 .
- [22] Pierre MOUNANGA « Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques »
- [23] M. DJEDDOU et B. REMINI « Incorporation Environnementale des sédiments issue d'opérations de dragage dans le domaine des matériaux de construction Cas d'étude barrage Fom El-Gherza »
- [24] MOKHTARIA BENKADDOUR, FATIHA KAZI AOUAL, ABDELAZIZ SEMCHA ; Séminaire « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle »; Laboratoire <<LABMAT>>, Département Génie Civil, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET Oran), B.P. 1523 Oran.

- [25] ABDELAZIZ SEMCHA « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. » ;thèse de doctorat ; Décembre 2006.
- [26] C.TASDÉMIR « Combined effect of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete» Cement and concrete research.
- [27] EFFSTATHIADIS,E. « Greek Concrete of Three Milleniums » ;Hellinic,Ministry of public works ;April 1978.
- [28] LEA F.M., « The chemistry of ciment and concrete »,chemical publishing,Inc.,1971.
- [29] MALINOWSKI R., « Concrete and mortard in ancient aqueducts » ;concrete international ;January 1979.
- [30] COLLEPARDIS,M.,Personal communication,University of Anacona,Italy, Septembre 1985.
- [31] PRICE,W.H., « Pozzolans-A review » journal American concrete institute ,proceedings, volume 72 ;May 1975.
- [32] MEISSNER H.S, « Pozzolans used in mass concrete» ASTM,Special technical publication,V.99,1950.
- [33] MIELENZ R.C., «Mineral Admixtures –Hystory and background»,Concrete International,August 1983.
- [34] Wu Z, «Building Materials Research Inst, Peking China, Personal communication, August 1985.
- [35] EL BAR MOHAMED «Influence de la temperature de cure sur les proprietes des mortiers pouzzolaniques » thèse de magistère 2009/2010.
- [35] BARRON J. SAUTEREY R. « Le béton hydraulique ».Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris, p559.
- [36] Laboratoire d'analyse et d'essai de matériaux (LCPC) ;essais de la section ciment.
- [37] ASTM618 « Standard spécification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete »
- [38] RACHIDA IDIR « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique » ; thèse de doctorat ; université de Toulouse ; juillet 2009.
- [39] CHRISTELLE BICH « contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique »
- [40] UNIVERSITE DE SHERBROUK, Les ajouts dans le ciment- GCI 712

Chap. 7 page 26.32.39, disponible sur site web < http://www.usherbrooke.ca/recherche/en_cours/genie_chimique/Genie>

[41] SCHNINDLER AK, FOLLIARD KJ, « Influence of supplementary cementing materials on heat hydration of concrete, Advanced in cement and concrete» IX Conference, Colorado, PP.10-14, 2003.

[42] NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments-Partie 2 « Analyse chimique des ciments » Août 1995.

[44] EL BAR MOHAMED « Influence de la température de cure sur les propriétés des mortiers pouzzolanique » these de magister ENSET d'Oran 2009/2010.

[45] N. KAID, TASDEMIR « Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des mortier pouzzolaniques »

[46] N. BELAS BELARIBI, A. SEMCHA, A. LAOUFI « Influence de la pouzzolane naturelle de Béni Saf sur les caractérisations mécaniques des bétons »

[47] MUSTAPHA CHEIKH ZOUAOUI « Contribution à l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons à haute résistance »

[48] FREE EBOOKS DATABASE « Chaleur d'hydratation et fissurabilité »

[49] BENIA Mounir « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux »

[50] ALEXA BRESSON « influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge »

[51] C. KIRPACH, « Ciments Luxembourgeois », Séminaire- Béton 2001: Journée d'information technique, 23 novembre 2001, P 7-21.

[52] Paul Acker, Jean-Michael Torrenti, Franz-Josef Ulm « Comportement du béton au jeune âge »

[53] ARNAUD PERTUÉ « Etude expérimentale du retrait endogene, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges »

[54] REVUE DE LA DOCUMENTATION, UNIVERSITE LAVAL, Hydratation du ciment Portland, Collection Mémoires et thèses électroniques
<http://www.theses.ulaval.ca/2006/23642/ch02.html>

[55] Jérémie POURCHEZ « Aspects physico-chimiques de l'interaction des éthers de cellulose avec la matrice cimentaire »

[56] R. DUPAIN, « Granulats, sels, ciments et bétons », 2ème édition, Janvier 2000, Edition

Casteilla.

[57] R.DUPAIN ;R.LANCHON ;J.C.SAINT ARROMAN « Granulats,sols,ciments et béton »

[58] TANGI LE BORGNE « Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols »

[59] BOGUE R.H« The chemistry of portland Cement ,Ed.Reinhold,New York,USA,1955»

[60]Norme NF P15-403:AFNOR.Sable normal et mortier normal.

[61] Norme NF P18-598:Granulat-Equivalent de sable ; Octobre 1991.

[62]Norme (NF P18-325) Bétons-Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité.

[63] Laboratoire « LTPO » d'oran.

[64] cours en ligne de matériaux de construction « Mortier de réparation. 5.4 Caractéristiques principales » www.la.refer.org/materiaux/chapitre_cinq_exp.html

[65]NF EN 196-6 Méthodes d'essais des ciments-Partie6 « Détermination de la finesse »Aout 1990.

[66] Laboratoire de la cimenterie de Zahana.

[67] ASTM C 1437-01 , « Standard Test Method for Flow of Hydraulic Ciments et Bétons»,2001

[68] Laboratoire d'analyse chimique (CETIM) Boumerdesse.

[69] M. GHOMARI F. & Mme BENDI-OUIS A. « science des matériaux de construction (travaux pratiques) »