



Mémoire de fin d'études

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

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME :
ETUDE DE COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DU
MORTIER ET BETON A BASE DES CIMENTS TERNAIRES.

Préparé par : DJEKRIF Daoud
BENCHIKH Abd Elouahab

Soutenu le : 25-06-2013

Devant le jury :

Président : ATTIA Abdelkader
Rapporteur : NOUI Ammar
Examinatrice: TABET.S
Examineur : BOUGUERRA Abdallah

MAA Université de BBA
MAA Université de BBA
MAA Université de BBA
MAA Université de BBA

Année Universitaire 2012-2013



REMERCIEMENTS

Il n'est jamais facile de faire des remerciements, toujours peur d'oublier quelques noms ou des proches alors que nous vous prions de bien vouloir nous excuser si les lignes qui vont suivre vous paraissent incomplètes. Les gens qui nous entourent savent bien à quel point on les remercie.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers DIEU de nous avoir guidé dans la réalisation de ce modeste travail. Ainsi que mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu durant toute la durée de mes études.

Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr. NOUI Amar, pour le suivi, les conseils et les encouragements qu'il nous a attribués.

Tous les enseignements de : Génie Civil :
*Mr. MESSAOUDENNE, Mr. LOGZIT, Mr. BENAICHI Lhadj, Mr. REMADNA Mr. SEDDIKI
Mr. BOUKELOUA, Mr. ATIA, Mr. MOHAMAD I, Mr. MEKKI, Mr. MOKHTARI. Mr. Larbi...*

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

Nous adressons nos remerciements à tous les responsables du Labo de Génie Civil, ZOBIR, RACHID, FARID, HAYAT, HUSSIEN et FATIHA qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Nous remercîments aussi l'administration de génie civil, AHLEM, AHMED, SAFIA, CHAHRA.

DAOUD*ABD ELOUAHAB



Résumé :

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland. Cependant malgré les avantages techniques, économiques et écologiques rapportés par l'utilisation des ciments composés, ces derniers restent associés à des inconvénients. Il est donc nécessaire de savoir si des ciments à plusieurs composants (ternaires) ont des effets synergiques de façon à ce que leurs ingrédients arrivent à compenser leurs faiblesses mutuelles. L'objectif de notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : Pouzzolane naturelle, laitier de haut-fourneau (ajouts actifs), sur les propriétés mécaniques des mortiers élaborés selon des différentes combinaisons à base de ces ajouts. Ceci permettra de sélectionner les couples optimaux pour les ciments ternaires, les plus performants, du point de vue résistance mécanique. Les résultats tirés de ce travail de recherche confirment que pour les mélanges (A6, B6) qui contient le taux de 10% de pouzzolane + 25% de laitier améliore la résistance des mortiers aux tous âges, par contre pour les mélanges (A2, B2) qui contient 30% pouzzolane + 05% laitier nous avons remarqué que les mortiers confectionnés à base des ciments qui contient ces deux taux ont donné les plus petites résistances particulièrement à 28 jours. Pour le béton, on remarque que l'utilisation du sable mixte (40% sable concassé, 60% sable de dune (oued souf) dans la formulation de béton permet d'obtenir des performances mécanique mieux à celles de béton formulé par sable de dune ou concassé seul.

Mots clés : *Pouzzolane naturelle, Laitier de haut-fourneau, sable normalisé, sable mixte, ciment ternaire, mortier, béton, résistance mécanique.*

« ملخص »

تعتمد صناعة الإسمنت في الغالب على مواد تكون مصادرها نفايات صناعية او موارد طبيعية لكن و رغم تلك الإيجابيات التقنية الاقتصادية و البيئية الناتجة عن استعمال الإسمنت المركب يبقى هذا الأخير يعاني من بعض السلبيات لهذا وجب البحث عن تركيبات و خلطات جديدة في عملية صناعة الإسمنت (الإسمنت الثلاثي) , الهدف الأساسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تأثير المنشطات المعدنية مثل البوزولان الطبيعي وخبث الأفران على الخصائص الميكانيكية للمونة المتكونة أساسا من الإسمنت الثلاثي لكن مع تغيير النسبة المئوية للمنشطات المعدنية من نوع لآخر وهذا ما يسمح بانتقاء التراكيب المثالية وخاصة في ما يتعلق بالمقاومة الميكانيكية للمونة , حيث أكدت النتائج المتحصل عليها ان النوع (A6-B6) و الذي يتكون من 10 % بوزولان و 25% خبث قد أعطى مقاومة ميكانيكية أفضل من باقي الأنواع و على العكس من ذلك فإن النوع (B2-A2) و الذي يحتوي على نسبة 30% بوزولان و 05% خبث قد ابدى مقاومة ميكانيكية ضعيفة مقارنة لا نواع الأخرى اما فيما يخص الخرسانة فقد لخضنا انا استعمال الرمل المختلط (40%) رمل المحجرة و 60% رمل عادي من منطقة واد سوف في عملية الخلط قد اعطى مقاومة ميكانيكية افضل من الانواع الأخرى التي استعمل فيها الرمل العادي او رمل المحجرة فقط.

كلمات مفتاحية : بوزولان طبيعي, خبث الأفران, رمل مصحح, رمل مختلط, اسمنت ثلاثي, مونة , خرسانة, مقاومة ميكانيكية.

Chapitre I : Généralités et Historique

I.1.Introduction	01
I.2. Problématique	02
I.3. Objectifs de l'étude	02
I.4. Structuration du mémoire.....	02

Chapitre II : Revue générale sur les ciments et béton

1^{ere} partie : le ciment.....	03
II.1. Le ciment	03
II.1.1. Introduction	03
II.1.2. Les ciments en général (Types et normalisation).....	03
II.1.3. Quelques caractéristiques des principaux ciments	05
II.1.5. Le clinker	08
II.1.5.1. Définition	08
II.1.5.2. La composition chimique du clinker	08
II.1.5.3. La composition minéralogique du clinker.....	09
II.1.5.4. Caractéristique de la qualité du clinker et détermination des modules	13
II.1.6. Principe de fabrication des ciments	14
II.1.6.1. Processus de cuisson	15
2^{eme} partie : Béton	18
II.2. Béton ordinaire	18
II.2.1. Introduction	18
II.2.2. Formulation de béton	18
II.2.3. Classification des bétons	19
II.2.4. Etude de la composition du béton	20
II.2.5. Constituants de béton	21
II.2.5.1. Le ciment	21
II.2.5.2. Les granulats	21
a. Les différents types des granulats	22
b. Classifications des granulats	23
c. Gravier	24
d. Sable	25
e. Eau de gâchage	27

II.2.6. La Principaux Propriétés du béton à l'état frais	27
II.2.7. Les principaux Caractéristiques du béton durci	30
II.2.7.1. La déformation des bétons	30
II.3. Conclusion	31

Chapitre III : Les ajouts minéraux

III.1.Introduction	32
III.2.Classification des ajouts minéraux	33
III.2.1. Les ajouts minéraux actifs	33
III.2.1.1. La pouzzolane	33
III.2.1.2. Le laitier de haut fourneau	35
III.2.1.3. La fumée de silice	36
III.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes	39
III.2.2.1. Fillers calcaires	39
III.2.2.2.La poussière	40
III.3. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil	40
III.3.1. Intérêt du point de vue économique	40
III.3.2. Intérêt du point de vue technique	41
III.4. L'utilisation des ajouts en Algérie	42
III.5.Conclusion	43

Chapitre IV : Matériaux, matériels et protocoles d'essais

IV.1.Introduction	44
IV.2.Le ciment	44
IV.2.1. Propriétés essentielles des constituants	46
IV.2.1.1. Composition chimique du clinker	46
IV.2.1.2. Composition Minéralogique du clinker	46
IV.2.1.3. Les compositions chimiques des ajouts	46
IV.2.2. Essais et équipements	46
IV.2.2.1.Détermination des propriétés physiques	46
IV.3.La préparation de Sable normalisé	49
IV.4.Le sable concassé	50
IV.5.Le gravier	50

IV.5.1. Analyse granulométrique	50
IV.6.L'eau de gâchage	51
IV.7.Détermination des propriétés mécaniques	52
IV.7.1.Essai de rupture par flexion	53
IV.7.2.Essai de rupture par compression	53
IV.8.Préparation de béton	54
IV.8.1. Méthodes de formulation du béton.....	55
IV.8. 2. Calcul de La Composition du béton	55
IV.8.2.Méthode de Scramtaiev	55
IV.9.Conclusion	56

Chapitre V : Résultats et analyses.

V.1.Introduction	57
V.2. Les résultats expérimentaux obtenus	57
V.3. Interprétation des résultats expérimentaux obtenus	66
V.3.1.Résistance à la compression	66
V.3.2.Résistance à la flexion	69
V.3.2.1.Effet de la surface spécifique de Blaine (S.S.B)	69
V.3.3.Resistance a la compression pour le béton à base de ciment ternaire.....	73
V.4. Conclusion	74

Chapitre VI : Conclusions générales et perspectives :

VI.1.Introduction	75
VI.2.Conclusion générale	75
VI.3.Perspectives et recommandations pour des travaux de future	76
-Références bibliographiques :.....	77

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux :	Page
Chapitre II : Revue générale sur les ciments et béton	
Tableau II.1 : Classe de résistances des ciments	06
Tableau II.2. Composition chimique de CPJ	08
Tableau II.3. La composition chimique du clinker	09
Tableau II.4 : La teneur des principaux composants dans la farine crue	14
Tableau II.5 : les différents procédés de fabrication des ciments	15
Tableau II.6: Classes de résistance du béton	20
Tableau II.7 : classement de granulats	24
Tableau II.9 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abram	29
Tableau II.8 : refus cumulés sur tamis	24
Chapitre III : Les ajouts minéraux	
Tableau III.1 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	35
Tableau III.2 : Composition chimique type de certaines fumées de silice	37
Tableau III.3 : Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitcin	38
Tableau III.4. Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	42
Chapitre IV : Matériaux, matériels et protocoles d'essais.	
Tableau IV.1. Pourcentages des constituants dans chaque type de ciment	45
Tableau IV.2 : Composition chimique du clinker du mois d'avril 2013	46
Tableau IV.3 : Composition Minéralogique du clinker du mois d'avril 2013	46
Tableau IV.4 : Les compositions chimiques des ajouts	46
Tableau IV.5. : analyse granulométrique du sable normalisé	49
Tableau IV.6: Compositions de béton	56
Chapitre V : Résultats et analyses	
Tableau V.1. ciment témoin A1 (35% pouzzolane, 0% laitier)	58
Tableau V.2. ciment ternaire A2 (30% pouzzolane, 5% laitier)	58
Tableau V.3. ciment ternaire A3 (25% pouzzolane, 10% laitier)	59

Liste des Tableaux

TableauV.4. ciment ternaire A4 (20% pouzzolane, 15% laitier)	59
TableauV.5. ciment ternaire A5 (15% pouzzolane, 20% laitier)	60
TableauV.6. ciment ternaire A6 (10% pouzzolane, 25% laitier)	60
TableauV.7. ciment ternaire A7 (5% pouzzolane, 30% laitier)	61
TableauV.8. ciment témoin A8 (0% pouzzolane, 35% laitier)	61
TableauV.9. ciment témoin B1 (35% pouzzolane, 0% laitier)	62
TableauV.10. ciment ternaire B2 (30% pouzzolane, 5% laitier)	62
TableauV.11. ciment ternaire B3 (25% pouzzolane, 10% laitier)	63
TableauV.12. ciment ternaire B4 (20% pouzzolane, 15% laitier)	63
TableauV.13. ciment ternaire B5 (15% pouzzolane, 20% laitier)	64
TableauV.14. ciment ternaire B6 (10% pouzzolane, 25% laitier)	64
TableauV.15. ciment ternaire B7 (5% pouzzolane, 30% laitier)	65
TableauV.16. ciment ternaire B8 (0% pouzzolane, 35% laitier)	65

Liste des Figures :	Page
Chapitre II : Revue générale sur les ciments et béton	
Fig. II.1 : Influence du pourcentage en C ₃ S sur la résistance du mortier	10
Figure.II.2: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	28
Figure.II.3: Résistance du béton frais	29
Chapitre IV : Matériaux, matériels et protocoles d'essais	
FigIV.1. Courbe d'analyse granulométrique de sable A (100% concassée)	50
FigIV.2. Analyse granulométrique du gravier	51
FigIV.3. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	53
figIV.4: Dispositif de rupture en compression	54
Chapitre V : Résultats et analyses	
figV.1 : l'effet de la surface spécifique sur la résistance à la compression a 02 j	66
figV.2 : l'effet de la surface spécifique sur la résistance à la compression a 07 j	67
fig.V3 : l'effet de la surface spécifique sur la résistance à la compression a 28j	67
Fig. V4 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la compression pour les ciments classe A (SSB=3200)	68
Fig. V5 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la compression pour les ciments classe B (SSB=5000)	68
figV.6 : l'effet de la surface spécifique sur la résistance à la flexion à 02 j	70
figV.7 : l'effet de la surface spécifique sur la résistance à la flexion à 07 j	70
figV.8 : l'effet de la surface spécifique sur la résistance à la flexion à 28 j	71
figV.9 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la flexion pour les ciments classe A (SSB=3200)	71
Fig. V.10 l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la flexion pour les ciments classe B (SSB=5000)	72
Fig. V.11 : l'effet du pourcentage d'ajouts, qualité de sable et surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la compression pour le béton	74

Chapitre I :

Généralités et Historique

Chapitre I : Généralités et Historique

I.1. Introduction :

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine.

L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le laitier, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental. La minimisation de l'élimination de ces résidus industriels et la diminution de la demande en ressources présente généralement une durée de vie plus longue que le béton «traditionnel».

Dans l'industrie de ciment lorsqu'un des ajouts cimentaires est ajouté au ciment, ce dernier est dit « binaire » et s'il y'en a deux ajouts il est appelé « ternaire ». Cette approche qui consiste à unir divers matériaux cimentaires existe depuis le début des années 80. Par contre ce n'est que depuis quelques années que l'industrie du béton se montre de plus en plus réceptive à cette nouvelle façon de faire le béton.

Lorsqu'un des ajouts cimentaires est ajouté au ciment il permet au béton de poursuivre sa performance mécanique même après la période de mûrissement normale de 28jours, c'est pourquoi il est utilisé pour des projets de constructions devant être particulièrement durables, comme les chaussées, les ponts, les tunnels, les viaducs, les barrages et les plates-formes pétrolières.[1]

I.2. Problématique :

Pour améliorer certaines propriétés des ciments, plusieurs études ont optées pour l'introduction des ajouts minéraux actifs ou inertes dans leur fabrication. L'intérêt technologique de l'utilisation des ajouts réside dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dans les performances sont aussi bonnes que celles du CPA et de même classe de résistance, sauf aux courts termes, ce qui limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (exemple : CPJ) présentent, par rapport aux autres types de ciments une meilleure résistance à l'agressivité des eaux douces.

L'intérêt économique de l'addition des constituants secondaires aux ciments et de diminuer son prix de revient du fait que le coût énergétique de ces ajouts est pratiquement nul.

Dans ce contexte, il a été proposé ce travail qui consiste à optimiser le taux des ajouts (laitier, pouzzolane) afin de garder les mêmes propriétés notamment les résistances mécaniques (résistances à la flexion, et à la compression).

I.3. Objectifs de l'étude :

Cette recherche a pour objectifs :

- 1- Etudier le comportement physique et mécanique du mortier et béton à base de ciments ternaires.
- 2- Optimiser le taux des ajouts (laitier, pouzzolane) dans le ciment ternaire.

I.4. Structuration du mémoire :

Ce travail est présenté en six chapitres synthétisés comme suit :

Chapitre I : Introduction et Historique.

Chapitre II : Revue générale sur les ciments et bétons.

Chapitre III : Revue Générale sur les ajouts.

Chapitre IV : Matériaux, Matériels et Protocoles d'essais.

Chapitre V : Résultats et Analyses.

Chapitre VI : conclusion, recommandation et perspective pour les travaux de future.

Chapitre II :
Revue générale sur les
ciments et béton

Chapitre II : Revue générale sur les ciments et béton**1^{ère} partie : le ciment****II.1. le ciment :****II.1.1. Introduction :**

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et le serrage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durcir progressivement (plus au moins rapidement, d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec Liants aériens « à base de chaux grosse et maigre » qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air. [2]

II.1.2. Les ciments en général (Types et normalisation) :

La nouvelle normalisation comporte cinq types principaux de ciments :

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

A titre d'information, nous avons fait dans la suite de ce titre le parallèle entre les éléments des anciennes normes, commercialisés. Jusqu'au fin décembre 1994 et les ciments des nouvelles normes qui leur succèdent. [3]

II.1.2.1. Ciment Portland :

a) jusqu'à fin 1994, sous le terme général de « Ciments Portlands » étaient englobés les deux catégories de ciments suivants :

Le ciment Portland artificiel (CPA)

Le ciment Portland composé (CPJ)

Le ciment Portland artificiel (CPA) contenait au moins 97% de clinker, le reste étant du filler.

Le ciment Portland composé (CPJ) contenait au moins 65% de clinker, le reste l'un ou plusieurs des autres constituants énumérés précédemment.

b) Dans la nouvelle normalisation, on retrouve ces deux catégories, mais avec des appellations un peu différentes et surtout dans le cas des ciments Portlands composés, plusieurs sous-catégories.

Les ciments Portland comprennent en conséquence :

- Le ciment Portland Type I.
- Le ciment Portland composé Type II.

Le ciment Portland Type I dont la dénomination est « CPA-CEM I » contient au moins 95% de clinker, le reste pouvant être, dans la limite de 5%, l'un des constituants de base énumérés précédemment ou un filler.

Le ciment Portland composé Type II avec les dénominations « CPJ-CEM II/A » et « CPJ-CEM II/B » contient de clinker (K) et un autre constituant

Les ciments « CPJ-CEM II/A » contiennent de 80 à 94% de clinker et de 6 à 20% de l'un des constituants énumérés ci-dessus ; à l'exception des fumées de silice dont le pourcentage est limité à 10%.

Les ciments « CPJ-CEM II/B » contiennent de 65 à 79% de clinker et de 21 à 35% de l'un des autres constituants. [4]

II.1.2.2. Ciment de Haut fourneau (CHF) :

Jusqu'à fin 1994, les ciments de haut-fourneau « CHF » contenaient de 25 à 60% de clinker et de 40 à 70% de laitier avec éventuellement un filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants.

Les nouveaux ciments de haut-fourneau constituant les ciments de Haut-Fourneau Type III, au nombre de trois catégories, couvrent une plage plus étendue englobant notamment les ciments de laitiers au clinker CLK .

II.1.2.3. Ciments de clinker (CLK) :

Ce ciment qui contenait au moins 80% de laitier et au plus 20% de clinker n'existe plus dans la nouvelle norme, mais est classé dans les ciments de haut-fourneau sous la dénomination « CLK-CEM III/C ».

II.1.2.4. Ciments pouzzolaniques :

La nouvelle normalisation comporte, dans les ciments Type IV, deux catégories de ciments pouzzolaniques dont la dénomination générale est « CPZ-CEM IV », qui diffèrent en fonction de leurs pourcentages respectifs de clinker et de l'autre constituant à propriété pouzzolanique, qui peut être soit des pouzzolanes (Z), soit des cendres volantes siliceuses (C) , soit dans la limite de 10% des fumées de silice(D). On distingue :

Les ciments « CPZ-CEM IV /A » contenant de 65 à 90% de clinker (K) et de 10 à 35% de l'un des constituants précédents avec éventuellement de 0 à 5% d'un constituant secondaire autre que celui entrant dans la composition, tel un filler.

Les ciments « CPZ-CEM IV/B » contenant de 45 à 64% de clinker et de 36 à 55% de l'un des autres constituants, avec également la possibilité d'un maximum de 5% d'un constituant secondaire.

II.1.2.5. Ciments de laitier et aux cendres (CLC) :

Ces ciments étaient constitués jusqu'à fin 1994 de 60% de clinker, de 20 à 45% de cendres volantes et de 20 à 45% de laitier avec éventuellement un filler dans la limite de 3%.

La nouvelle normalisation distingue deux catégories de ciment au laitier et aux cendres constituant de Type V dont la dénomination générale est « CLC-CEM V », soit :

Les ciments « CLC-CEM V/A » contenant :

- de 40 à 64% de clinker.
- de 18 à 30% de laitier (S).
- de 18 à 30% de pouzzolane (Z) ou de cendres siliceuses (V).

Les ciments « CLC-CEM V/B » contenant :

- de 20 à 39% de clinker.
- de 31 à 50% de laitier.
- de 31 à 50% de pouzzolane ou de cendres siliceuses. [4]

II.1.2.6. Autres ciments :

1. ciments (prise mer) (PM).
2. ciments à faible chaleur d'hydratation initiale à teneur en sulfures limitée.
3. ciments prompts (CNP).
4. ciment Alumineux fondu.
5. Ciments blancs.
6. Ciment pour béton précontraint. [5]

II.1.3. Quelques caractéristiques des principaux ciments :

II.1.3.1. classe de la résistance :

Les ciments se caractérisent en fonction de leur classe de résistance à la compression, ces dernières, mesurées à 28 jours d'âge, étant exprimées en MPa pour les ciments fabriqués jusqu'à fin 1994, on distinguait 4 classes de résistances dont les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous (les ciments de la classe 35 n'existant pratiquement plus depuis plusieurs années) :

Tableau II.1 : Classe de résistances des ciments.

Désignation de la classe Mpa	Sous-classe éventuelle	Résistances à la compression		
		à 2 jours	à 28 jours	
		Limite inférieure nominale Mpa	Limite inférieure nominale Mpa	Limite supérieure nominale Mpa
35	-	-	25.0	45.0
45	-	-	35.0	55.0
45	R(Rapide)	15.0	35.0	55.0
55	-	-	45.0	65.0
55	R(Rapide)	22.5	45.0	65.0
HP (hautes Performances)	-	-	55.0	-
	R(Rapide)	27	55.0	-

Remarque importante :

Il est très important de noter que les classes de ciments commercialisés jusqu'à la fin de 1994 étaient indiquées en fonction de leur résistance moyenne à la compression à 28 jours, chaque dénomination de classe comportant une limite inférieure de 10 MPa en moins et une limite supérieure de 10MPa en plus (ex : classe 45, limite inférieure nominale 35 MPa, limite supérieure nominale 55 MPa, valeur minimale garantie 35 MPa. [6])

II.1.4. Ciment Portland composé (CPJ) :**II.1.4.1. Définition :**

Les ciments Portland composé (CPJ) contenaient au moins 65% de clinker et 5% d'ajout régulateur de prise (gypse).et un autre constituant (maximum 30%) qui peut être :

- du laitier de haut fourneau (s)
- des Pouzzolanes naturelles (Z)
- des cendres volantes siliceuses (V)
- des cendres volantes calciques (W)
- des schistes calcinés (T)
- des fumés de silice (D) [7]

II.1.4.2. Propriétés des CPJ :

a) Hydratation :

En présence d'eau, les sels minéraux amorphes, anhydres et instables s'hydratent, il se produit une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables ; la formation des cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrés produit « la prise ».

L'eau nécessaire par l'hydratation est en général de l'ordre de 20 à 25% du poids de ciment.

b) Prise :

Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures. Les ciments Portland composés (CPJ) classe 45 doivent satisfaire, en ce qui concerne le début de prise mesuré sur mortier à 1h.30mn à 20°C.

c) Durcissement :

Après la prise, le phénomène d'hydratation se produit ; c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue ; pour les ciments à prise rapide mais pour les CPJ le durcissement se produit pendant quelques jours.

d) Action de la température :

D'une façon générale, la chaleur accélère la prise et le durcissement. Le froid agit en sens inverse et peut même stopper complètement la prise, les ciments selon leur type, sont plus ou moins sensibles à la température. Avec une température inférieure à +5°C. [8]

e) Variation de dimension accompagnant la prise et le durcissement :

-Retrait :

Les valeurs de retrait sont limitées à :

- 800µm/m pour les ciments CPJ des classes 35 et 45 concernant les nouveaux ciments.
- 1000 µm/m pour les ciments CPJ- CEM II. Des classes 32.5R et 42.5R.

-Gonflement :

Il est de l'ordre de 0.1 mm/m à 28J sur pâte pure, il est trois à cinq fois moins élevé sur mortier et béton.

f) Indice d'hydratation :

L'indice d'hydratation ou indice de Vicat est le rapport de la fraction acide sur la fraction basique :

$$I = \frac{\text{Fraction acid}}{\text{Fraction basique}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice est plus élevé :

- Quand $I < 0.5$, le ciment est dit basique (Portland).
- Quand $I > 0.5$, le ciment est dit neutre (riche en laitier).
- Quand $I \neq 1$, le ciment est dit acide. [8]

II.1.4.3. Composition chimique de CPJ:

TableauII.2. Composition chimique de CPJ

Oxyde	SiO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R.ins	P.F	CaO.I
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
²	30÷40	3.8÷4.6	3÷4.4	40÷50	0.87÷1.6	1.6÷2.5	10÷22	3.5÷5	0.4÷0.7
CPJ à base d'ajout laitier	18÷25	3.8÷4.6	3.1÷4.4	55÷65	0.87÷2.2	1.6÷2.5	1÷5	6÷10	0.3÷0.7

Après cet aperçu sur les différentes propriétés du CPJ, il s'avère indispensable d'exposer dans ce qui suit les différents constituants de ce ciment composé le plus répandu et utilisé. [8]

II.1.5. Le clinker :

II.1.5.1. Définition :

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃). Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne ...). C'est le clinker qui par broyage en presque d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle d'un régulateur de prise, donne des « Portland » et confère aux ciments de ce groupe leurs propriétés caractéristiques.[9]

II.1.5.2. La composition chimique du clinker :

TableauII.3. La composition chimique du clinker

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R.ins	SO ₃
Teneur Limite(%)	60-69	18-24	4-8	1-8	<5	<2	<3
Valeur moyenne(%)	65	21	6	3	2	1	1

II.1.5.3. la composition minéralogique du clinker :

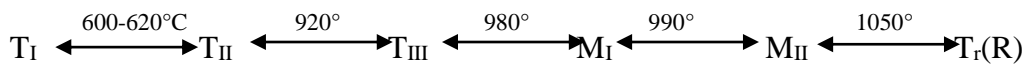
Les quatre principaux constituants du clinker sont :

1. le silicate tricalcique : $\text{SiO}_2, 3 \text{CaO}$ (ou C_3S), (50 à 65%)
 $\% \text{C}_3\text{S} = 4.071 \% \text{CaO} - 7.6 \% \text{SiO}_2 - 6.718 \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.43 \% \text{Fe}_2\text{O}_3$.
2. le silicate bi-calciqye : $\text{SiO}_2, 2 \text{CaO}$ (ou C_2S), (15 à 20%)
 $\% \text{C}_2\text{S} = 4.071 \% \text{CaO} + 8.602 \% \text{SiO}_2 + 5.068 \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 1.078 \% \text{Fe}_2\text{O}_3$.
3. l'aluminate tricalcique : $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$ (ou C_3A) ; (5 à 15%).
 $\% \text{C}_3\text{A} = 2.65 \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.69 \% \text{Fe}_2\text{O}_3$.
4. l'alumino-ferrite tétra-calciqye : $4 \text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$, (ou C_4AF) de (5 à 10%)
 $\% \text{C}_4\text{AF} = 3.04 \% \text{Fe}_2\text{O}_3$.

On distingue selon la composition minéralogique du clinker :

1. Le ciment fortement alitique : C_3S plus de 60%.
2. Le ciment alitique : $\text{C}_3\text{S} = 50$ à 60%.
3. Le ciment fortement bélitique : $\text{C}_3\text{S} = 35\%$.
4. Le ciment aluminatique : $\text{C}_3\text{S} = 12\%$
5. Le ciment aluminoferrique : $\text{C}_4\text{AF} = 18\%$ et $\text{C}_3\text{A} = 2\%$.

a) Le silicate tricalcique (alite C_3S) : le silicate tricalcique est le minérale le plus important du clinker, il y six modifications possibles qui sont les suivantes :



Ce sont les six modifications qui existent pendant le refroidissement ou l'échauffement.

T : modification tricalcique

M : modification monoclinique

R : modification rhomboédrique

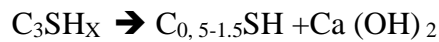
Toutes les modifications ont des réseaux cristallins voisins, la modification T_I est la plus stable, ses paramètres sont les suivants :

$(a,b,c) = (24.398 - 14.212 - 25) \text{ \AA}$, elle se cristallise sous forme de plaques hexagonales ayant un $M_g = 1.717$, $M_p = 1.714$ est une masse spécifique $MSP = 1.13-3.25 \text{ g/cm}^3$, sa dureté et de 5 à 6 sur l'échelle MOHS, il possède une grande réactivité avec l'eau. L'hydratation du C_3S se manifeste instantanément par un refroidissement donnant naissance à des particules vernies- culées, le C_3S réagit rapidement avec l'eau suivant la réaction suivante :



Le C_3SH_x étant sous forme gel enrobe les grains de C_3S pour réduire la vitesse d'hydratation de C_3S .

Cet hydrosilicate se décompose après 2 à 6h d'hydratation suivant la réaction.



Silicate silicate

Primaire secondaire

Le silicate secondaire se combine ensuite avec la chaux hydratée suivant la réaction :



Le $C_{1,5-2}SH$ améliore la résistance mécanique du ciment.

Le C_3S : Procure au ciment les résistances à court terme, car son hydratation et son durcissement sont très rapides sa résistance à 7 jours atteinte environ 70% de sa résistance à 28 jours qui est d'environ 490 kgf/cm² à partir de 28^{ème} jours. L'augmentation de cette résistance sera faible, presque constante à 180 jours donc la résistance initiale du ciment augmente avec l'augmentation du pourcentage de C_3S .

Les chercheurs WOODS, STEINOUR et STAKE ont basé leurs études sur l'influence de la concentration du C_3S dans les ciments sur la résistance de ces derniers, les courbes obtenues ont un aspect rectiligne dont la pente se croit suivant l'âge (figII.1). [9]

Rc Kgf/cm²

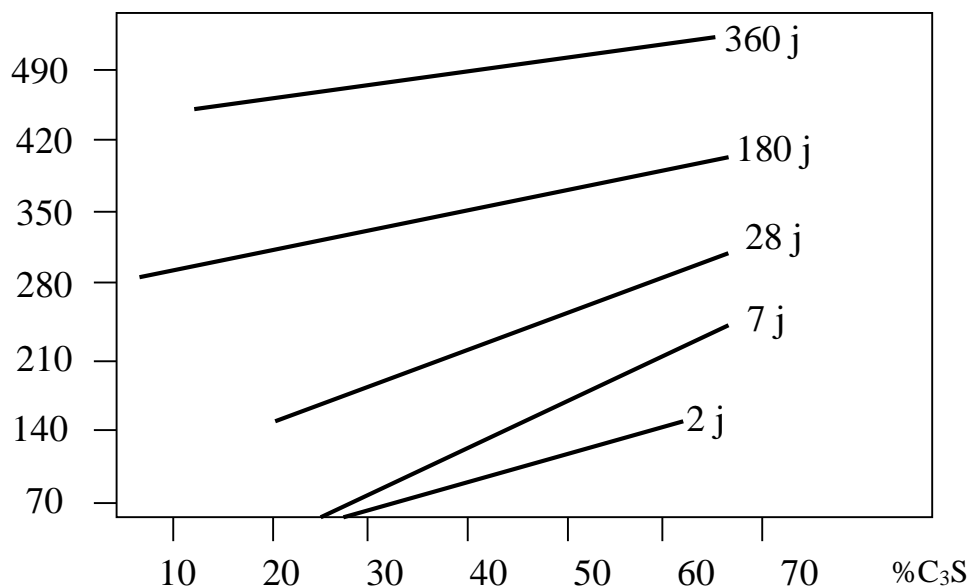


Fig. II.1 : Influence du pourcentage en C_3S sur la résistance du mortier

b) Le silicate bi calcique (bilité C_2S) :

Il possède un polymorphisme très complexe, il se présente sous forme de trois modifications.

- $\alpha - C_2S$: il est stable dans les limites de températures 1447°C , elle peut être fixée à la T° ambiante à l'aide d'agents stabilisateurs qui forment avec le C_2S des solutions solides exemple : $Ba_2S O_4$, $Ca_3 (PO_4)$, $Na_3 (PO_4)$.
- $\acute{\alpha} - C_2S$: cette modification est stable entre $830 - 1447^\circ\text{C}$. elle peut être fixée à la température ambiante à l'aide de d'agents stabilisateurs.
- $\beta - C_2S$: cette modification n'a pas un domaine d'existence métastable est 670°C . à une température ambiante elle peut être fixée à l'aide de d'agents stabilisants tels que B_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 , P_2O_5 ,.....
- préparer, elle est pesée avec une précision de 0.5%.Le $\beta - C_2S$ possède les propriétés hydrauliques et contribue à la résistance mécanique à long terme.

Le stockage de clinker permet la transformation de βC_2S en $\gamma -C_2S$ par pulvérisation de clinker et ceci facilite le broyage du clinker, ce phénomène est lié à l'augmentation du volume des cristaux de 10% ce qui provoque des contraintes interne, la structure monoclinique du $\beta - C_2S$ est caractérisé par les paramètres suivants : $(a, b, c) = (5,48 - 6,76 - 9,98) \text{ \AA}$.

- $\gamma -C_2S$: cette modification est stable dans le domaine d $T = 830^\circ\text{C}$ à la température ambiante le $\gamma -C_2S$ ne réagit pas avec l'eau mais il est capable de durcir après un traitement à température et à pression élevée.

La composition de la bilite du clinker industriel peut être représentée par :

Ca_{87} . Mg , Al . $Fe (Na_{0,5} - K_{0,5}) A_{13}$. Si_{42} . O_{180} .

Le C_2S : avec son hydrations très lente, ne contribue presque pas à la résistance initiale du ciment, à 28 jours, il atteint environ 70 KgF/cm^2 . Ce qui est très faible en comparaison avec C_3S presque terminé, mais celle de C_2S commence à ce développé intensivement et sa résistance augmente rapidement et au bout d'une année elle atteint celle de C_3S et peut même la dépasser. Donc contrairement au C_3S , si on trace la courbe représentant variation de la résistance en fonction de C_3S on aura des droites dont la pente est presque nulle, avant 28 jours, mais elle augmente considérablement après 28 jours.

Pour ces raisons si on a besoin d'un ciment à haute résistance à courte durée, on utilise le clinker à forte teneur, on C_3S , (ciment alitique), et si on veut un ciment à haute résistance à Long terme on utilise le clinker a forte teneur on C_2S , (ciment bilitique). [10]

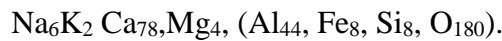
c) L'aluminate tricalcique (célite C_3):

L'aluminate tricalcique ne possède aucune transformation polymorphique, il se cristallise sous forme de tableau hexagonal, ce réseau cristallin de sa cellule est cubique,

température de fusion $T_f = 1537^\circ\text{C}$, la masse spécifique $M_{sp} = 3,04 \text{ g/cm}^3$, sa dureté est 6 sur l'échelle de MOHS.

Le C_3A réagit avec l'eau très rapidement en donnant les hydroaluminates de calcium.

Le C_3A représente une solution solide il peut y avoir jusqu'à 2,5 % de MgO , 0,3 % de C_2rO_3 , 1% MnO_2 , 9 % de Na_2O et 0,4 de K_2O . La formule de la solution solide de C_3A est la suivante :



L'aluminate tricalcique réagit vite avec l'eau en donnant du C_3AH_6 ou du C_4AH_{12} . Qui se cristallisent dans le système hexagonal qui est instable à la température ordinaire, elle se transforme en système cubique avec une variation de volume

Le C_3A : à une contribution insignifiante pour la résistance de ciment, il atteint environ 50 kgF/cm^2 à 28 jours et à partir de 90^{ème} sa résistance devient presque constante elle est d'environ 70 kgF/cm^2 cependant il a une hydratation rapide.

d) Alumino-ferrites de calcium (C_4AF) :

Sont des solutions solides de différents éléments le C_4AF .

Dans le système (C-A-F) la composition des phases est rhomboédrique lors de l'hydratation du C_4AF il se forme le C_4AF hydraté amorphe, il peut également former.

Après hydratation poussée du C_3AH_6 qui se transforme en C_3FH_6 après substitution de Fe_2O_3 suivant la réaction $\text{C}_4\text{AF} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{C}_3\text{FH}_6, \text{C}_3\text{AH}_6)$.

Le C_4AF : a une haute réactivité d'hydratation mais il participe très peu à la résistance mécanique de ciment, sa résistance atteinte environ 25 kg F/cm^2 a 28 jours, et à partir de 90 jour elle devient presque constante (25 kgF/cm^2).

e) Les autres phases du clinker :

Par les minéraux cités précédemment, on connaît dans le clinker la présence dans différents composés à la suite de la présence d'impuretés de CaO et MgO libres. Le SiO libre CaO et MgO provoque une inégalité de volume de ciment. [10]

f) Les alcalis :

Ils se trouvent dans le clinker dans son réseau cristallin et forment des composés indépendantes K_2SO_4 , $3\text{K}_2\text{SO}_4$, Na_2SO_4 entre 700 et 1200°C , les composés intermédiaires peuvent se composer $\text{K}_2(\text{CO}_3)$ Ca , K_2O Al_2O_3 Na_2 Ca $(\text{CaO}_3)_2$ Na_2CaO_3 $2\text{Na}_2\text{SO}_3$ Na_2O Al_2O_3 .

Les alcalis effectuent la circulation à l'intérieur du four, ils contribuent à la formation des anneaux à l'intérieur de la zone de préchauffage. [11]

II.1.5.4. Caractéristique de la qualité du clinker et détermination des modules :

Le choix d'un clinker dépend de la teneur en oxyde (caractéristique chimique) composition minéralogique (caractéristique minéralogique).

a- Module hydraulique:

$$M_h = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{C}{S+A+F}$$

Il varie entre 1,7 et 2,3

Si $M_h < 1,7$ le ciment durci aurait une faible résistance mécanique

Si $M_h > 2,3$ le ciment est expansif à cause du CAO libre élevé présent dans le ciment.

b-Module silicique :

$$M_s = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{S}{A+F} = [1,9-3,2]$$

Un bon clinker est voisin (2,2 et 2,6). Si $M_s > 2,7$ le ciment à une haute teneur en silice lors de la cuisson la teneur en phase liquide est réduite. Ce qui rend difficile la cuisson.

Si $M_s < 1,9$ la cuisson est facile à cause de la grande quantité de la phase liquide.

c-Module alumino ferrique :

$$MAF = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} = (1.5 - 2.5)$$

Pour un bon clinker MAF varie entre [0,8 et 2]

Si $MAF = 0,64$ la phase C_3A ne se forme pas.

La viscosité de la phase liquide augmente. [12]

d-Degré de saturation en chaux LSF :

$$CSC = \frac{100\text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,1\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3} = [90-99]$$

Ou

$$CSC = \frac{\text{CaO} - (1,1\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3)}{2,8\text{SiO}_2}$$

CSC \leq 100 le ciment représente la quantité optimale de CaO

CSC $>$ 100 le ciment a une faible résistance et le taux de chaux libre $>$ 2%. [12]

II.1.6. Principe de fabrication des ciments :

Le ciment Portland composé résulte de broyage d'une roche artificielle, le clinker avec le gypse et un ajout (calcaire, pouzzolane...).

Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange convenablement dosé en calcaire (environ 80%) et une argile (environ 20%), mais d'autres matériaux peuvent être utilisés marne.

La composition des principaux composants doit être située de préférence dans les limites qui sont désignés dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : La teneur des principaux composants dans la farine crue.

Matières Compositions	Calcaire	Marne	M.F.D
SiO ₂ %	< 5	5-30	5-8
CaO %	47-55	30-50	4-10
MgO %	< 2.5	0.5-2.5	1-2.5
Al ₂ O ₃ %	< 1.5	1.5-7	1-2
Fe ₂ O ₃ %	< 1.5	1.5-3	6.5-10

La fabrication se réduit aux trois opérations suivantes :

- Préparation des matériaux.
- Cuisson.
- Broyage.

Suivant l'état des matériaux et suivant certaines considérations économiques, on adopte l'un des procédés suivants (voir tab.II.5) : voie humide, semi-humide (en partant de la voie humide), voie sèche, voie semi- sèche (en partant de la voie sèche).[13]

TableauII.5 : les différents procédés de fabrication des ciments

Extraction en carrière (ciel ouvert) (Calcaire, argile, marne) concassage Transport)	
<i>Voie humide</i>	<i>Voie sèche</i>
Délaiage (+ broyage) Dosage Stockage Four	Concassage Pré homogénéisation Broyage-Séchage Homogénéisation (fluidisation) Four
<i>Voie semi-humide</i>	<i>Voie semi-sèche</i>
Filtration Boudinage Four	Granulation Four
Clinker	
<i>Tronc commun</i>	Broyage Gypse + constituants secondaires Eventuellement Stockage Expédition { sac { vrac
	{ Laitier { Cendre { Pouzzolane

Dans l'unité de Ain-Kebira, la voie utilisée pour la fabrication des différents types de ciment c'est la voie sèche car elle est la plus économique mais elle n'assure pas une bonne homogénéisation des matériaux. On va détailler cette voie beaucoup plus par la suite, de grandes différences entre ces procédés apparaissent dans la phase finale de la préparation du matériau et lors de la cuisson. [13]

II.1.6.1. Processus de cuisson :

On consiste que depuis l'alimentation du four en cru jusqu'à la sortie du clinker par le refroidisseur. La matière passe par les étapes suivantes :

a) Le four rotatif :

Le four rotatif est un tube incliné 3 à 5° par rapport à l'horizon qui tourne autour de son axe. Le tube appelé aussi vérole réalisée en construction chaudronnerie repose sur certain nombre d'appuis par l'intermédiaire le bondage et de galette, il est revêtu à l'intérieur de matériaux réfractaire (4 m de diamètre et 70m de long).

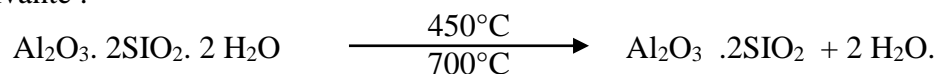
Le degré d'inclinaison et là sa lente rotation permettant à la matière de cheminé vers l'aval tout etapes en se transformant en clinker. (Il peut produire 2500 t de clinker par jour).

-Zone de chauffage :

L'échauffement aura lieu dans l'échangeur de chaleur par les gaz provenant du four, cette opération se déroule des cyclones.

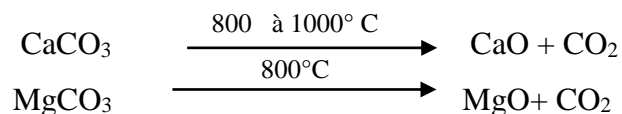
-Zone de déshydrations :

La déshydrations se déroule généralement dans le 2^{ème} et le 3^{ème} cyclone, dégagent de l'eau de cristallisation à une température d'environ 500°C, ce que s'explique la réaction suivante :



-Zone de décarbonatation :

La décomposition se presque se fait à partir du 4^{ème} cyclone du pré-chauffeur jusqu'elle arrive dans le jour. Dans cette zone la matière reçoit la température environ 800°C. La décarbonatation est de 25 à 30% de la composition, ainsi les carbonates de Calcium et de magnésium. Les réactions de décarbonatation :



-Zone de calcination.

-Zone de clinkérisation. [14]

b) Le refroidisseur :

Le clinker sortant du four tombe en chute libre sur une grille légèrement inclinée parallèle à l'axe du four est constitué d'un mouvement du va-et-vient permettant une progression lente du clinker vers la sortie du refroidissement.

c) Filtre à graviers :

Ils sont destinés pour le dépoussiérage des gaz sortant du refroidisseur dont la température varie de 400 à 500°C, et une teneur en poussière inférieure à 50g/m³, chaque filtre est

constitué de plusieurs cellules identiques place de part et d'autre et assemblées au canal des gaz. Le clinker obtenu tombe du refroidisseur, il reçoit après un concasseur à marteau pour concasser des particules grosses et transportées par des élévateurs à godets.

d) Le broyage et l'expédition :

Le clinker obtenu par l'un des procédés mentionnés est stocké dans des halls. Il est ensuite repris pour alimenter des broyeurs à boulets de 20 à 90 mm. Ils sont compartimentés en deux ou trois chambres. Ils fonctionnent :

- En circuit ouvert (passage direct de la matière).
- En circuit fermé (le ciment est envoyé dans des séparateurs, les gros grains sont renvoyés dans une des chambres du broyeur).

Un broyeur moyen produit de 20 à 30t de ciment à l'heure, les gros broyeurs actuels peuvent produire 200 t/h et plus.

Le rendement des broyeurs à boulets est très faible et de l'ordre de quelques pour cent. On a ajoutant lors du broyage deux types d'agent de mouture à très faible dose (500 g/t) afin d'éviter la réagglomération des particules les plus fines.

Le ciment est stocké dans des silos de 1000 à 5000 t, Il est délivré en sac papier (généralement trois plis) de 50 Kg où en vrac. [14]

2^{eme} partie : Béton

II.2. Béton ordinaire :

II.2.1. Introduction :

Le béton a été depuis longtemps le matériau de construction, le plus couramment utilisé ; tout comme dans le cas dans les autres industries, le besoin universel de conserver les ressources de protéger l'environnement et bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie de béton. Il est considéré comme un composite constitué de granulats dont les propriétés dépendent, pour une grande part de sa formulation, il est obtenu en solidarissant par une pâte de ciment. Un squelette granulaire composé d'un sable et gravier, comme le liant a de propriétés hydraulique, ces bétons sont appelés béton hydrauliques.

Dans ce chapitre on présente une revue générale sur le béton ordinaire et ces constituants (ciment, gravier, sable, eau), ainsi ces propriétés principales. [15]

II.2.2. Formulation de béton :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment:

- la méthode Baron ;
- la méthode Bolomey ;
- la méthode de Féret ;
- la méthode de Faury ;
- la méthode Dreux-Gorisse.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats.

D'autres exigences de la norme NF EN 206-1 imposent l'emploi de ciment particuliers en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc. [15]

II.2.3. Classification des bétons:

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique:

- Béton très lourd: $\rho > 2500 \text{ Kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant): ρ entre : 1800 - 2500 Kg/m^3 .
- Béton léger : ρ entre: 500 - 1800 Kg/m^3 .
- Béton très léger : $\rho < 500 \text{ Kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants:

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

La norme EN 206 classes les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau (II-6), Dans ce tableau f_{ckcyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Euro code 2) ; f_{ckcube} est la résistance caractéristique mesurée sur cubes. Les valeurs soulignées sont les valeurs recommandées. [16]

Tableau.II.6: Classes de résistance du béton

Classe	<u>C12/15</u>	<u>C16/20</u>	<u>C20/25</u>	<u>C25/30</u>	<u>C30/37</u>	<u>C35/45</u>	<u>C40/50</u>	<u>C45/55</u>	<u>C50/60</u>
f_{ckcyl} (Mpa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_{ckcube} (Mpa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

II.2.4. Etude de la composition du béton :

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression. Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier. Le béton doit présenter un faible retrait (source de fissurations internes et externes : phénomène de « faïençage ») et un fluage peu important. Le coût du béton doit rester le plus bas possible. Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées :

- minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée ;
- bonne étanchéité améliorant la durabilité ;
- résistance chimique ;
- résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe : 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 Kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés. [17]

II.2.5. Constituants de béton :

II.2.5.1. Le ciment :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de «pâte de ciment durcissant» sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide. [18]

II.2.5.2. Les granulats :

On appelle «granulats» les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux issus de carrières, blocs de roche concassés et broyés, ou des granulats roulés, extraits du lit des rivières qui entre dans la composition des bétons. Ces matériaux sont quelque fois appelés (agrégats).

La taille des granulats varie en fonction de celle du coffrage, de la densité d'acier pour les éléments en béton armé, et du type de béton recherché.

Les granulats comprennent les sables et pierrailles. Ils sont classés en fonction de leurs grosseurs.

1. Les différents types des granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels. Leur taille variable déterminera l'utilisation du béton (les gros granulats pour le gros œuvre, les très fin pour les éléments moulés). La résistance du béton augmente avec la variété des calibres mélangés.

a. Les granulats naturels :

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres [18]

b. Granulats roulés et granulats de carrières :

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories qui doivent être conformes à la norme NF EN 12620 (granulats pour bétons)

1. les granulats alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires ;
2. les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

c. Les granulats artificiels :

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau. La masse volumique apparente est supérieure à 1 250 Kg/m³ pour le laitier cristallisé concassé, 800 Kg/m³ pour le granulé. Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers.

d. Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.

e. Granulats allégés par expansion ou frittage :

Ces granulats, très utilisés dans de nombreux pays comme les États-Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance,

d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les gains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 Kg/m³.

f. Les granulats très légers :

Ils sont d'origine végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 Kg/m³) ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 Kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants. [19]

2. Classifications des granulats:

Les granulats sont classés en fonction de leurs dimensions par criblage sur des tamis à mailles carrées dont les dimensions intérieures sont en (mm).le terme (granulats d/D) est réservé ou granulats ont les dimensions s'étalent de d pour les petits à D pour les refus grands, le tableau suivant détermine les classes des granulats.

Tableau.II.7 : classement de granulats

Appellation	Mailles carrées des tamis (mm)	
Farine, fillers		<0.08
Sable	Petits	0.080<D<0.310
	Moyens	0.310<D<1.250
	Gros	1.250<D<5.00
Gravillons	Petits	5.00<D<8.00
	Moyens	8.00<D<12.50
	Gros	12.50<D<25.00
Pierres cassées	Petits	25.00<D<40.00
	Moyens	40.00<D<63.00
	Gros	63.00<D<100.00

3. Gravier :

a. Définition :

++On appelle gravier l'accumulation des grains de 5 à 70 mm provenant de la distraction naturelle des roches. Tandis que la pierre concasser par broyage des roches massives, de gravier pierre artificielle, en morceaux dont les démentions varient de : 5 à 70 mm [20]

b. Granularité de gravier:

la granularité conditionne la porosité de mélange, si tous les grains, ont une même grosseurs , ont aurais une porosité maximale, donc pour avoir un mélange de volume des vides minimum il faut une composition granulométrique des grains de différents dimensions qui doit se situer dans les limites appelées (fuseaux de spécifications) :

Tableau.II.8 : refus cumulés sur tamis.

Tamis	Limite de refus cumulé (%)
D_{\min}	90-100
D_{\max}	0-10
$\frac{1}{2}(D_{\min}+D_{\max})$	40-70
$\frac{5}{4} D_{\max}$	0

c. Nature de gravier:

Le gravier provient de roches naturelles ou artificielles, constituées de minéraux chaque roches à sa propre composition chimique minéralogique. Sa résistance, son adhérence avec les ciments.

L'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment influe sur la résistance de béton, l'état de la surface lisse. Les grains de gravier concassé (naturel et artificiel) ont des surfaces rugueuses, donc ces derniers s'adhèrent mieux que le gravier naturel au ciment durci dans le béton, en revanche le mélange du béton à base de gravier concassé naturels et artificiels et moins fluide en raison de l'angularité de ces derniers.

d. Forme de gravier :

Les grains d'un gravier se distinguent par leurs formes : sphériques, cubiques allongées, Le coefficient volumique CV permet de donner une idée précise sur la forme de l'élément considéré. C'est pour un grain, le rapport entre le volume absolu ou volume de la sphère circonscrite à la plus grande dimension de grains.

Le coefficient volumique est donné par la relation : $c_{gv} = V / [(5/6) R^3]$

v : volume absolu de grain de gravier.

d : la plus grande dimension du grain de gravie

Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de «plats» et «d'aiguilles» à l'opposé en coefficient élevé correspondants à un granulats dit «cubique» ou «arrondi»

La norme AFNOR P18-301 préconise :

$C_v \geq 0.15$ pour les graviers de 12.5 à 25 mm

$C_v \geq 0.11$ pour les cailloux de 25 à 50 mm

La présence d'impuretés dans le gravier influe beaucoup sur la qualité de béton, car les impuretés perturbent l'hydratation de ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment. [20]

4. Sable :

a. Définition :

Le sable est une masse meuble de matières minérales inorganiques, finement granuleuses (0.08 à 5mm), habituellement composées de quartz (silice), et d'une petite proportion de mica, de feldspath, de magnétite et autres minéraux durs. C'est le résultat de l'érosion, dégradation et abrasion des roches par des processus chimiques et mécaniques. Quand les grains viennent de se former, ils sont habituellement anguleux et très pointus. Par la suite sous l'action du vent et de l'eau, ils s'usent, s'arrondissent et deviennent de plus en plus petits.

Le sable est un élément très important dans la constitution des bétons et c'est généralement par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons.

b. Classification de sable :

*Suivant leurs grosseurs : en trois types

- | | |
|----------------|-----------------|
| a) sable fin | 0.08 à 0.315 mm |
| b) sable moyen | 0.315 à 2.00 mm |
| c) sable gros | 2.00 à 5.00 mm |

*suivant leur provenance :

-sable de rivière : absence de grains fins.

-sable de dunes : uniformité et prédominance de grains fins.

-sable de plaines ou d'alluvions : absence de gros grains.

-sable résidus de concassage : prédominance de gros grains et présence de farines, ou fines ou fillers et le sable de mer. [21]

c. Rôle du sable dans le béton :

Dans le béton le sable occupe presque $\frac{1}{4}$ de son volume par conséquent la qualité du sable influant considérablement sur la qualité du béton.

Il remplit avec le ciment et l'eau tous les vides entre les grains de gravier décidant ainsi la structure compacte du béton, d'autre part de son coût de revient, puisqu'il est toujours moins cher que le ciment.

d. Caractéristiques des sables a la fabrication du béton :

La propriété des sables se déterminer par différentes méthodes parmi elles la méthode de l'équivalent de sable {Es} l'emploi d'un sable souillé conduit à une baisse de la résistance et une augmentation de retrait dans le béton.

La dureté des grains et enfin un facteur important pour l'obtention d'un béton convenable.

Les sables siliceux sont les meilleurs, les sables calcaires au contraire sont rarement assez durs pour assurer au béton une bonne résistance.

Notons que les sables peuvent contenir une quantité d'eau importante jusqu'à 200 litres et plus par 1m^3 , pour cela lors de détermination de dosage en eau il faut tenir compte de cette teneur en eau du sable, ou bien il faut sécher le sable en utilisant l'étuve ou bien naturellement. [21]

5. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage et la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton, cette eau est une grande importance, elle est soumise à certaines exigences est à même fait l'objet d'une norme (NF 18-303).

On conçoit donc, en premier lieu, que les impuretés nocives interdites pour les granulats ne doivent pas être apportées par l'eau de gâchage.

a. Caractéristiques physiques :

L'eau de gâchage des bétons doit être propre, ne pas contenir de matières en suspension au-delà de certaine valeurs permises

Les tolérances réglementaires sont les suivant :

-2g/l pour les bétons type A

-3g /l pour les bétons type B

-5g/l pour le béton type C. [22]

Les matières en suspension n'ont pas la même nocivité.

-béton type A : béton de haute qualité à résistance élevée.

-béton type B : béton a faible perméabilité

-béton type C : béton a faible résistance peut au non armé.

b. Caractéristiques chimiques:

L'eau de gâchage des bétons ne doit pas contenir de sels dissous au-delà de :

-15g/l pour les bétons type A et type B.

-30g/l pour le béton type C.

L'eau de mer est admise pour le gâchage des bétons du type C, sauf certaines prescriptions spéciales

Toute eau douteuse doit être analysée chimiquement au laboratoire spécialisé. [22]

II.2.6. Les Principaux Propriétés du béton à l'état frais :

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement ou encore utilisent l'énergie potentielle du béton ou nécessitent un apport d'énergie extérieur.

On comprend qu'il est difficile de convenir d'un tel appareil tenant compte de tous les bétons possibles pour tous les usages et qui tiennent compte aussi des différents facteurs de l'ouvrabilité. Certains appareils sont utilisés à la fois par les laboratoires et par les chantiers. La distinction proposée est donc parfois assez artificielle, sauf dans le cas d'appareillage très élaboré. [23]

a. L'ouvrabilité du béton frais.

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera Affaissement au cône d'Abrams qu'est le plus couramment utilisé dans la pratique.

-Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances

de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la figure(II.2). se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure.

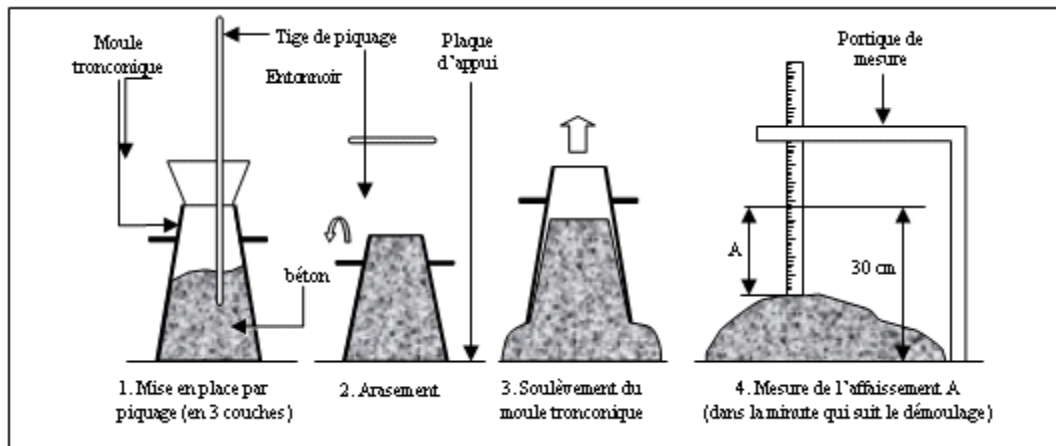


Figure.II.2: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau (II-9). [24]

Tableau.II.9 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abram.

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide F1	≥ 16	

b. Résistance du béton frais :

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (avant prise du ciment) d'éléments de grande série.

À la suite d'études faites sur ce sujet, il semble que:

- le rapport optimal E/C est voisin de 0,40 (béton plutôt sec),

- le pourcentage optimal $\frac{\text{Sable}}{\text{Granulat}}$ est d'environ 0,38 (soit : G/S = 2,6 valeur élevée),

- les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés,

- la fréquence de la vibration est prépondérante (résistance triplée quand on passe de 3000 à 6000 périodes par minute).

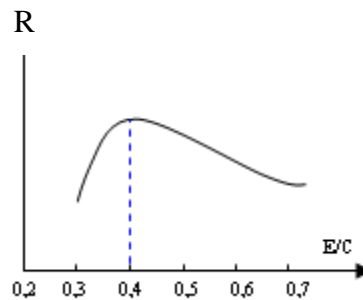


Figure.II.3: Résistance du béton frais.

La résistance en compression peut atteindre 0,3 à 0,4 MPa tandis que celle en traction ne dépasse guère $1/100^{\circ}$ de ces valeurs, soit 0,004 MPa.[24]

II.2.7. Les principales caractéristiques du béton durci :

II.2.7.1. La déformation des bétons :

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se compose comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en œuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques.

Dès la fin de la mise en œuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges. [25]

a. Le retrait de béton :

La durabilité des ouvrages en béton armé ou précontraint est fortement dépendante de la qualité du béton, et en particulier de la zone d'enrobage. C'est en effet au travers de la porosité que peuvent migrer des agents agressifs (sulfates, chlorures, CO₂, etc.) susceptibles d'interagir avec les constituants du ciment et de provoquer l'apparition de désordres. Néanmoins, la compacité des bétons ne peut, à elle seule, être garante de la bonne tenue dans le temps. En effet, la manifestation de phénomènes de fissuration ouverte dans la zone d'enrobage peut augmenter les propriétés de transfert des bétons, aussi compacts soient-ils, et ainsi nuire leur durabilité. Dans cette optique, la maîtrise de la fissuration précoce des bétons, liés aux phénomènes de retrait, apparaît essentielle.

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maîtrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures. [26]

b. Les conséquences du retrait :

Dans tous les cas, la conséquence essentielle du retrait est l'apparition de phénomènes de fissuration pouvant diminuer la durabilité des structures en béton armé ou précontraint, et/ou limiter leur capacité portante, notamment dans le cas de manifestation dans la masse. Cette fissuration peut conduire à limiter l'adhérence entre un matériau rapporté en surface (revêtement par exemple) et le support en béton.

Les conséquences de la fissuration sur la durabilité des structures en béton sont dues à l'augmentation de la cinétique de pénétration des agents agressifs présents dans le milieu environnant, au travers des fissures ouvertes sur les parements. L'impact que peut avoir une fissuration ouverte de surface sur un voile en béton armé affecté par un phénomène de retrait plastique. En dehors de la fissure, la profondeur de carbonatation, liée à la diffusion du CO₂ atmosphérique dans le béton, est limitée à quelques millimètres sur les deux faces, et aucun désordre n'est observé. En revanche, le phénomène de carbonatation est accéléré le long des fissures traversantes, entraînant ainsi la corrosion des armatures recoupées par les fissures. [26]

II.3. Conclusion :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

Chapitre III :

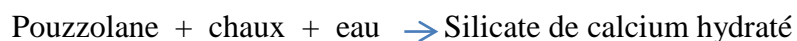
Les ajouts minéraux

Chapitre III : Les ajouts minéraux

III.1.Introduction :

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité.

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C₂S et du C₃S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :



Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide. [27]

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C₂S et du C₃S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète.

Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland. [27]

III.2. Classification des ajouts minéraux :

Selon la norme [ENV 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

III.2.1. Les ajouts minéraux actifs :**III.2.1.1. La pouzzolane :**

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

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments : [28]

a. pouzzolane naturelle :

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

b. Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques . Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories :

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes. [28]

c. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

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

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées. (Cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique .

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

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

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

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

- **Propriétés hydrauliques** : La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.
- **Propriétés physiques de remplissage** : En plus de leur effet pouzzolanique , elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires , ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité . [29]

III.2.1.2. Le laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique (tableau III.1), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

[30]

Tableau III.1 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
% SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
% Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
% CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
% Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
% MgO	6	3 à 12	4.7

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement

mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.

-Chaleur (étuvage, autoclavage).

-Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse). [30]

III.2.1.3. la fumée de silice :

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrossilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO₂. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage

.D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau III.2). La teneur en SiO₂ de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO₂ de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO₂. La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe -Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%.

Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.03 μ m et 0.3 μ m (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1 μ m), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron. [31]

Tableau III.2 : Composition chimique type de certaines fumées de silice.

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
% SiO ₂	93.7	87.3	90.0
% AL ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
% CaO	0.2	0.4	0.1
% Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
% MgO	0.2	0.3	0.2
% Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
% K ₂ O	0.5	0.6	1.3
% Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. 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. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3.1.

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. [31]

III.2.1.4. Les cendres volantes :

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

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (III.4) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires. [32]

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

Les cendres silico- alumineuses (cendre de houille) Les cendres sulfocalciques (cendre de lignite)

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

Tableau III.3 : Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitcin

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo – calcique	Sulfo- calcique
SiO ₂	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na ₂ O	2.2	0.4	2.2	0.8
SO ₃	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6

SiO ₂ +AL ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	28.0

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1 µm et 100 µm, leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m²/kg. La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton

En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres.

Volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces. [32]

III.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes :

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305) En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière. [33]

III.2.2.1. Fillers calcaires :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à

granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes). Les fillers se différencient les uns des autres par:

-leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.

-leur finesse, la forme des grains.

- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium.

Dans les autres cas,

Le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA

Peuvent jouer plusieurs rôles:

-Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).

-Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.

-Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C₃S et du C₃A et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.

-Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat. [33]

III.2.2.2. La poussière :

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^2/g . Le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. [33]

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

III.3.1. Intérêt du point de vue économique :

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En

effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles.

Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus. [34]

III.3.2. Intérêt du point de vue technique

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle). La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique.

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide. [34]

III.4. L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar , le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf . Le tableau (III.4) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau III.4. Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [35]

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

III.5.Conclusion :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

Chapitre IV :
Matériaux, matériels et
protocoles d'essais

Chapitre IV : Matériaux, matériels et protocoles d'essais.**IV.1.Introduction :**

Dans le but de mettre en évidence l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et des mortiers confectionnés à base de ciment ternaire des essais physiques, minéralogiques et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

-Laboratoire de cimenterie d'Ain- Kebira.

-Laboratoire de Département de Génie Civil de L'université Bordj Bou Arréridj.

IV.2.Le ciment :

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un ciment ternaire obtenu par broyage du clinker additionné au gypse, et éventuellement des constituants reconduits (pouzzolane et Laitier).

Ce travail, qui consiste à la préparation de différente composition de ciment ternaire et la détermination de leurs propriétés, a été divisé en deux étapes :

-1^{ère} étape :

On a préparé les matières premières, on procédant par séchage, concassage et finalement le broyage :

- **Le séchage :** Il a été effectué dans une étuve de séchage à température variant entre 100 et 110 °C durant 24 h il a pour but de déterminer le taux d'humidité et de séché les ajouts (Laitier, pouzzolane).
- **Le concassage :** ayant pour objectif de faciliter le broyage du mélange, le concassage a été effectué au laboratoire dans un concasseur à mâchoire.
- **Le broyage :** Il a été réalisé au laboratoire de cimenterie d'Ain-Kebira dans un mini-broyeur à boulets.
- **-2^{ème} étape :** Cette partie représente l'élaboration de ce projet par la formulation des ciments ternaire et binaires (témoins) au moyen d'un mélangeur dans le laboratoire de cimenterie de Ain -Kebira.

Le tableau suivant représente les pourcentages des constituants dans chaque type de ciment, avec leurs symboles :-les ciments (A), ils ont une surface spécifique Blaine(SSB)=3200 et les ciments (B) ils ont une (SSB)=5000.

Tableau IV.1. Pourcentages des constituants dans chaque type de ciment :

Symbole	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	% clinker + gypse	% laitier	% pouzzolane
A1	3200	65	0	35
A2		65	5	30
A3		65	10	25
A4		65	15	20
A5		65	20	15
A6		65	25	10
A7		65	30	5
A8		65	35	0
B1	5000	65	0	35
B2		65	5	30
B3		65	10	25
B4		65	15	20
B5		65	20	15
B6		65	25	10
B7		65	30	5
B8		65	35	0

Après l'obtention des produits finis (les différents types du ciment) on détermine pour chaque type les propriétés suivantes :

1. les propriétés physiques :

La masse volumique absolue, la surface spécifique de Blaine.

2. Les propriétés mécaniques :

Préparation de mortier et confection des éprouvettes, essais de rupture par flexion et compression (2, 7, 28 jours),

3. Les analyses chimiques : La composition chimique de clinker et des ajouts.

IV.2.1. Propriétés essentielles des constituants :**IV.2.1.1. Composition chimique du clinker :****Tableau IV.2 :** Composition chimique du clinker du mois d'avril 2013 :

%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SO ₃	%P.A.F	%CaO.L	%R.ins
22,57	4,86	5,46	65,35	0,43	0,9	0,67	0,32

IV.2.1.2. Composition Minéralogique du clinker :**Tableau IV.3 :** Composition Minéralogique du clinker du mois d'avril 2013 :

% C ₃ S	% C ₂ S	% C ₃ A	% C ₄ AF
52,32	24,39	3,66	16,62

IV.2.1.3. Les compositions chimiques des ajouts :**Tableau IV.4 :** Les compositions chimiques des ajouts :

Les composants	%SiO ₂	%AL ₂ O ₃	%FE ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%K ₂ O	%NaO ₂	%SO ₃	%Cl
Pouzzolane	65,34	15,02	2,95	2,52	1,33	2,21	1,70	0,2	-
Laitier	35,85	5,08	7,77	37,22	3,55	0,27	0,12	-	-
Gypse	10,05	2,99	1,55	26,90	3,86	0,41	0,05	30,33	0,007

IV.2.2. Essais et équipements :**IV.2.2.1. Détermination des propriétés physiques:**

Le but de ces analyses est d'apprécier la finesse de mouture, et la qualité du liant à analyser.

a) La surface spécifique Blaine (SSB) cm²/g :**-Définition :**

La SSB est la surface totale en cm² développée par 1 g de liant, elle est mesurée conventionnellement selon la norme NF-P 15 442, et exprimée en cm²/g. [36]

-Spécification du perméabilimètre – Blaine :

Le perméabilimètre – Blaine doit dépendre aux caractéristiques suivantes :

- **La cellule :** De masse utilisée à un bord supérieur plan et perpendiculaire à son axe, elle s'assemble à l'ajustage par un assemblage conique 19/35 ou de dimensions voisines.

- **Le piston** : son extrémité d'équerre et à bords vifs, il comprend un méplat (prolongé par échancrure dans la tête) pour permettre le passage d'air les tolérances de dimension doivent permettre un coulisement doux dans la cellule.
- La grille est plane et perforé de 30 à 40 trous de 1 mm de diamètre.
- La cellule, le piston et la grille sont en métal inoxydable.
- Les disques de papier filtre sont découpés à bord net dans un papier filtre à filtration courante, texture moyenne.
- Le manomètre en « U » est en verre de 1 à 1.5 mm d'épaisseur, il est fixé de préférence sur une planchette – support au moyen d'un collier.
- Le liquide affleurant au repos au trait inférieur doit être stable, non volatil et non hygroscopique de faible viscosité et de faible densité (dibutylphtalate, huile minérale, extra fluide ...). [37]

- Détermination de la surface spécifique :

La surface spécifique d'un liant est calculée en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et à la température connue, à travers une couche de liant tassé.

- Mode opération :

On place la grille au fond de la cellule, et on applique sur cette grille au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'équerre, un disque neuf de papier filtre.

On verse la quantité de liant déjà pesé dans la cellule. On utilisant un entonnoir, on donne quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis on place, sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre. On fait au moyen de piston un tassement, et on retire le piston lentement.

On aspire lentement au moyen de la paroi l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur.

On ferme le robinet et on met en marche le chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait.

On arrête le chronomètre à l'arrivée au troisième trait, et on note le temps entre les deux traits, ainsi que la température de la pièce, la surface spécifique de Blaine est calculée par :

$$S = \frac{K \cdot (\sqrt[3]{e} \cdot \sqrt{t})}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \text{ [Cm}^2\text{/g]}$$

t : temps passage de l'aire entre les deux traits en seconde.

K : constante de l'appareil, égale à 28,26.

E : porosité de la couche tassée, égale à 0,500.

ρ : masse spécifique des grains g/cm².

η : viscosité de l'aire, la température de l'aire est de 20°C.

Donc $\eta = 0,0001808$ donc $\sqrt{\eta} = 0,01344$. [38]

b) La masse spécifique :

On détermine la masse spécifique d'un liant par le densimètre LECHATÉLIER la masse spécifique peut être un indice de la qualité du liant, en générale, sa valeur permet de déceler l'introduction des adjuvants ou des produits étrangers aux liants, la masse spécifique est la masse d'un liant par unité de volume de matière plein, examiné dans les conditions d'ambiance (température, pression.....etc.)

-Technique de l'essai :

Il faut que le liant à analyser soit nettement pulvérisé en se servant au benzène ou d'essence minérale comme un liquide n'ayant pas une action chimique sur le liant à analyser, la température doit rester constante pendant l'opération (18-20°C).

- On pèse 64 g du liant.
- On introduit cette quantité dans le densimètre LECHATÉLIER déjà rempli en benzène.
- On introduit le densimètre dans un bain thermostatique à une température de $(20 \pm 1^\circ)$.
- Lorsque le niveau de benzène devient stable on note le volume déplacé v .
- On calcule la masse spécifique avec la formule suivante :
- $M_s = m/v$ [g/cm³].
- Où m = masse de liant dans le densimètre. [38]

IV.3. La préparation de Sable normalisé:

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, de sulfates...et dans le cas de sable concassé: des poussières, des plaquettes, des aiguilles. [39]

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable de dune de la région d'Oued- Essouf de fraction 0/2. Avant son utilisation, nous avons effectué une correction granulaire a ce sable afin d'avoir une granulométrie continue conformément au fuseau du sable normalisé.

La préparation de sable suivant les étapes :

- a) **Lavage** : pour éviter la présence de tous les éléments nocifs.
- b) **Séchage** : dans une étuve de séchage à température variant entre 100 et 110 °C durant 24 h.
- c) **Tamissage** : On a normalisé le sable de oued-Essouf suivant la norme « EN 196 2009 »

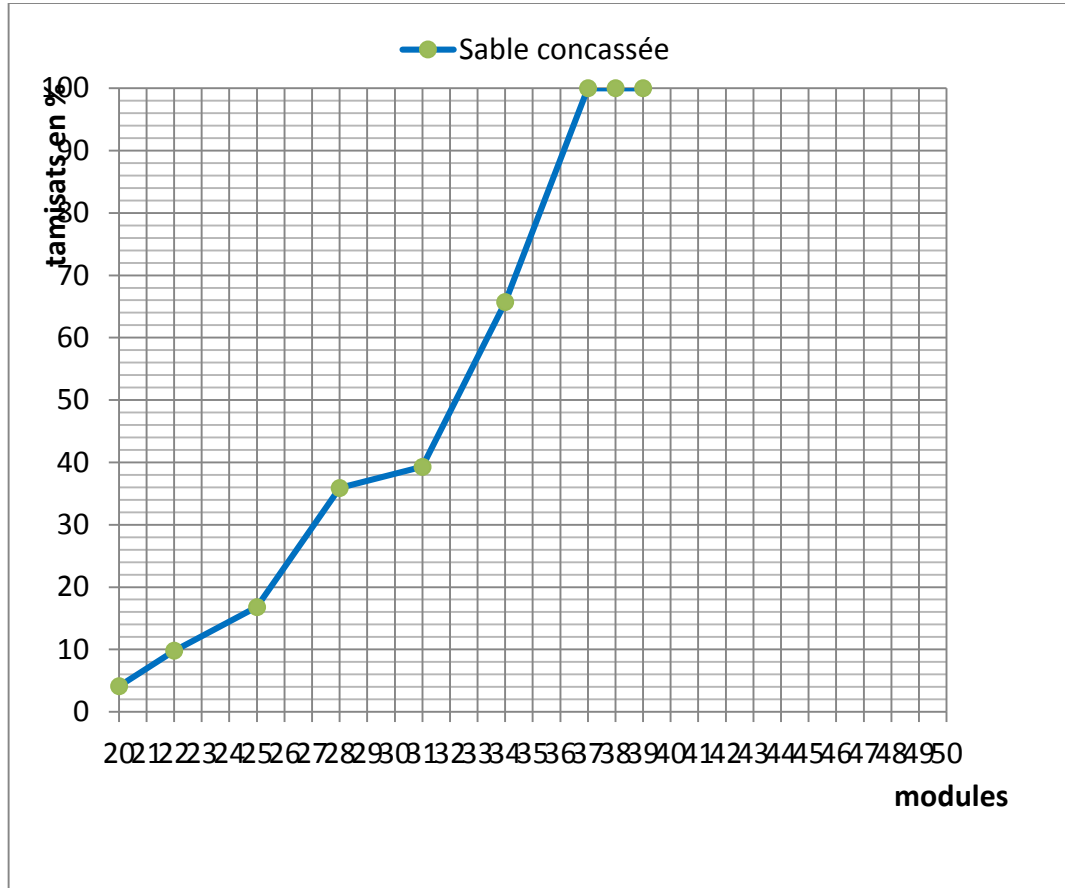
Les fractions du sable ont été mélangées selon le tableau (IV4) et conditionnés dans des sacs de 1350 g, qui sert à la préparation du mortier.

Tableau IV.4. : analyse granulométrique du sable normalisé

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

IV.4. Le sable concassé :

- Sable concassé provenant de la carrière Mechri Belimour localité située à environ 15 Km au sud de la ville de Bordj Bou Arreridj.



FigIV.1. Courbe d'analyse granulométrique de sable (100% concassé).

IV.5. Le gravier :

Dans notre cas les graviers utilisés sont prélevés de la carrière Mechri Belimour localité située à environ 15 Km au sud de la ville de Bordj Bou Arreridj.

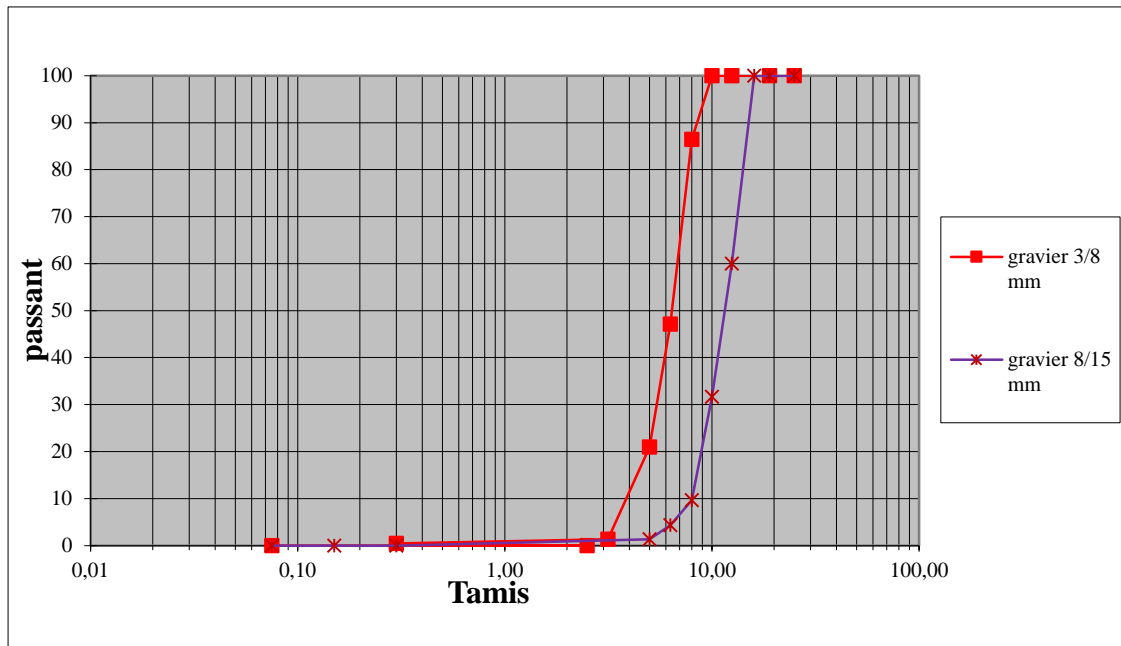
. Vu l'importance de la quantité de gravier entrant dans la composition du béton, et vue que l'exploitation de ce matériau ne nécessite pas beaucoup de dépenses, ni de grande technologie, les bétons qu'on fabrique seront évidemment plus économique.

IV.5.1. Analyse granulométrique :

On choisit deux types de graviers selon leurs dimensions (3/8, 8/15).

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

Elle s'applique à tous les granulats de dimensions minimales inférieures ou égales à (3mm) à l'exclusion des fillers.



FigIV.2. Analyse granulométrique du gravier.

IV.6.L'eau de gâchage :

- Toutes les eaux ne peuvent être utilisées pour gâcher les bétons et les mortiers, l'eau potable est toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent. Ces impuretés sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui sont indésirables.

- L'excès d'impuretés détériore les propriétés du béton : les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), [40]

- Dans notre étude nous avons utilisé l'eau de robinier de laboratoire de Génie civil.

IV.7.Détermination des propriétés mécaniques :

La présente norme NFP15- 451 a pour but de définir les essais de flexion et de compression permettant de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et à la contrainte de rupture à la compression des liants hydrauliques. [40]

a. Préparation du mortier normale :

Le mortier normal se compose en masse d'une partie du liant à essayer, de trois parties en sable normalisé. Selon la norme AFNOR NFP 15- 403 et une demi partie d'eau (E/C= 0.5).

La masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction de l'éprouvette à préparer, elle est pesée avec une précision de 0.5%.

Dans le cas de la préparation des trois éprouvettes 4×4×16, les quantités sont respectivement les suivantes :

Sable normale : 1350g.

Liant : 450g.

Eau : 225g.

b. Confection des éprouvettes :

- On prépare un mortier conformément à la norme
- Avec un malaxeur selon norme NFP.15-411.
- Le moule à éprouvettes prismatiques et accessoires selon la norme AFNOR NFP.15-413.
- Soit 450g de ciment, 225 ml d'eau et 1350g de sable normalisé.
- On mélange (sable + ciment +eau) dans le malaxeur normalisé.
- On introduit le mortier dans le moule à éprouvettes prismatiques 4×4×16.
- On fixe le moule sur la table à chocs pour le tassement (2×60 coups) selon la norme AFNOR NFR .15 – 412.
- On racle sur la surface supérieure l'excès de pâte, ensuite on introduit les moules dans une chambre humide à 20° ± 1°C pendant 24 heures.
- Après 24 heures on démoule, et introduit les éprouvettes dans un bain d'eau, Ces éprouvettes confectionnées sont :
 - pour 2 jours.
 - pour 7 jours.

- pour 28 jours.
- Les éprouvettes doivent être sorties de l'eau moins de 15 minutes avant chaque essai, elles sont alors essuyées avec un chiffon propre.

IV.7.1. Essai de rupture par flexion : norme NFP15- 451.

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7 mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une force latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant de deux premiers et transmettant de la charge F , pour faire une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux des appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leur centres, dans le plus vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes . [41]

La résistance à la flexion est calculée suivant la formule :

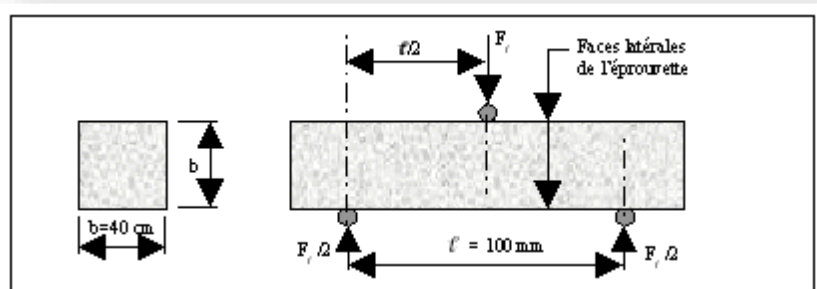
$$R_f = 3PL / 2bh^2 \text{ [KgF/cm}^2\text{]}.$$

P : force appliquée en [Kgf].

b : largeur de l'éprouvette.

h : hauteur de l'éprouvette.

L : distance entre les appuis (cm).



FigIV.3. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

IV.7.2. Essai de rupture par compression : norme NFP 15-451.

Chaque demi-éprouvette est essayé en compression sur ces faces latérales de moulage, sous une section de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur, de $40\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ de largeur, ces plaques sont en carbure de tungstène, la demi-éprouvette est placée entre elle de manière que son extrémité

intacte dépasse d'au moins 1cm et que les arrêtes longitudinaux d'éprouvettes soient perpendiculaires à celle des plaques.

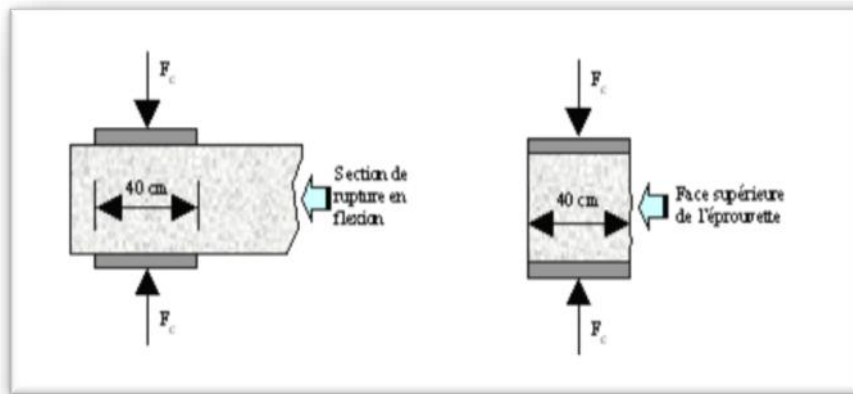
Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai , de manière à avoir la même projection horizontale, l'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait , plaque –faces d'éprouvette. [41]

La résistance à la compression et calculer suivant la formule :

$$R_c = F/S \text{ [KgF/ cm}^2\text{]}.$$

F : charge appliquée en KgF.

S : section latérale de l'éprouvette égale à 16 cm².



figIV.4:Dispositif de rupture en compression

IV.8.Préparation de béton:

Nous avons utilisées deux types de béton pour 16 éprouvettes cylindriques (10X20) :

-08 éprouvettes formulé par un ciment de SSB=3200 cm²/g, à base de sable mixte (40%concassé, 60%sable de dune)

-08éprouvettes formulé par un ciment de SSB=5000 cm²/g, (100% sable de dune).

-Les 16 éprouvettes de béton sont soumises à l'essai de compression en compression à l'âge de 28 jours.

IV.8.1.Méthodes de formulation du béton :

Le calcul de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (fins et gros) et en eau pour un dosage de 1m^3 de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique volume (exigée).

Il existe plusieurs méthodes de formulation du béton proposé et applique dans les différentes payes du monde, parmi ces méthodes on peut citer :

- ✓ Méthode de BOLOMEY (méthode à granularité continue)
- ✓ Méthode de FAURY
- ✓ Méthode de JOISEL
- ✓ Méthode de VALETTE
- ✓ Méthode de B.SCRAMTAIEV

Dans notre projet la méthode des volumes absolus élaborée par le professeur B.SCRAMTAIEV, a été adapté pour formule notre béton. [42]

IV.8.2.Méthode de Scramtaiev :

Le principe de cette méthode est suivant :

La somme de tous les matériaux composants pour un dosage de 1m^3 de béton frais est à 1000 litres.

Pour confectionner un béton, il faut connaître les méthodes de calcul en vigueur (calcul des dépenses en matières premières) et leur mis en œuvre.

On choisit alors les composants du béton d'une façon convenable dans des proportions bien définies.

Les données de base servant pour le calcul de la composition du béton sont :

- ✚ La classe de résistance requise du béton (R_b).
- ✚ Le degré de fluidité ou de consistance du béton.
- ✚ Les caractéristiques des matériaux d'origine.
 1. Activité du ciment (R_C).
 2. Masse spécifique (absolus) du ciment.
 3. Masse spécifique (absolus) et masses volumiques (apparentes) du sable, ou gravier.
 4. La porosité des pierres concassées ou du gravier.

La composition du béton c.à.d. la dépense (quantité) de ciment, eau, de sable et de pierres concassées ou de gravier est établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode d'essai de dosages expérimentaux de mélange de béton.

Les principes étapes de calcul de la composition du béton sont :

1. On définit le rapport (C/E) qui assure l'obtention d'un béton de résistance requise.
2. On détermine la dépense en eau (E).
3. On fait le calcul de la quantité de ciment (C), ensuite des pierres concassées (PC) ou gravier (G) et de sable(S). [42]

IV.8. 2. Calcul de La Composition du béton :

- Pour un béton de classe 250bars, éprouvette cylindrique (10X20) :

TableauIV.5: Compositions de béton

Composants	Pour 01 éprouvette
Ciment	0 ,575Kg
Gravier	2,293Kg
Sable	1,051Kg
Eau	0,388Kg
gâchage	4,307Kg

IV.9.Conclusion :

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

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

Chapitre V :

Résultats et analyses

Chapitre V : Résultats et Analyses.

V.1.Introduction :

- Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons d'ajouts (Pouzzolane Naturelle –Laitier de haut-fourneau).

- Ces résultats portent sur les résistances mécaniques (compression et flexion) aux échéances (2 - 7- 28) jours, ainsi que sur la résistance R_{c28} de béton

V.2. Les résultats expérimentaux obtenus :

Les résultats obtenus dans cette étude ont à regrouper dans 16 tableaux. Chaque tableau représente les différentes propriétés d'un ciment binaire (témoin) ou ternaire.

Les propriétés ont été classées, dans chaque tableau, en 02 catégories :

- Les propriétés physiques.
- Les propriétés mécaniques.

Tableau V.1. ciment témoin A1 (35% pouzzolane, 0% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	2,95	
S.S.B (cm ² /g)	3529	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	3,521
	7 jours	5,2
	28 jours	6,327
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	13,668
	7 jours	31,378
	28 jours	47,658
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	21,941	

Tableau V.2. ciment ternaire A2 (30% pouzzolane, 5% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	2,955	
S.S.B (cm ² /g)	3494	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	3,458
	7 jours	5,857
	28 jours	6,578
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	14,000
	7 jours	30,647
	28 jours	45,724
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	21,684	

Tableau V.3. ciment ternaire A3 (25% pouzzolane, 10% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	2,965	
S.S.B (cm ² /g)	3539	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	3,257
	7 jours	6,285
	28 jours	6,458
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	13,181
	7 jours	32,547
	28 jours	45,523
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	23,87	

Tableau V.4. ciment ternaire A4 (20% pouzzolane, 15% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	2,975	
S.S.B (cm ² /g)	3544	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,625
	7 jours	5,175
	28 jours	6,100
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	12,145
	7 jours	31,351
	28 jours	46,265
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	25,856	

Tableau V.5.ciment ternaire A5 (15% pouzzolane, 20% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	2,985	
S.S.B (cm ² /g)	3549	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,298
	7 jours	5,21
	28 jours	5,799
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	12,694
	7 jours	31,785
	28 jours	50,536
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	24,294	

Tableau V.6.ciment ternaire A6 (10% pouzzolane, 25% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	2,995	
S.S.B (cm ² /g)	3554	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,875
	7 jours	6,789
	28 jours	7,245
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	15,311
	7 jours	34,729
	28 jours	52,684
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	26,727	

Tableau V.7. ciment ternaire A7 (5% pouzzolane, 30% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,005	
S.S.B (cm ² /g)	3559	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,147
	7 jours	5,8
	28 jours	5,6
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	14,714
	7 jours	32,385
	28 jours	51,4
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	26,417	

Tableau V.8. ciment témoin A8 (0% pouzzolane, 35% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,015	
S.S.B (cm ² /g)	3564	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	3,9
	7 jours	5,174
	28 jours	5,103
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	15,161
	7 jours	32,526
	28 jours	49,967
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	27,136	

Tableau V.9.ciment témoin B1 (35% pouzzolane, 0% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,025	
S.S.B (cm ² /g)	4107	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	3,96
	7 jours	5,51
	28 jours	6,562
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	14,25
	7 jours	30,166
	28 jours	50,429
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	22,382	

Tableau V.10.ciment ternaire B2 (30% pouzzolane, 5% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,036	
S.S.B (cm ² /g)	4093	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,448
	7 jours	6,028
	28 jours	6,227
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	14,06
	7 jours	32,315
	28 jours	50,46
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (MPa)	21,428	

Tableau V.11. ciment ternaire B3 (25% pouzzolane, 10% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,046	
S.S.B (cm ² /g)	4079	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,544
	7 jours	6,46
	28 jours	6,914
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	13,739
	7 jours	32,319
	28 jours	53,371
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (MPa)	23,554	

Tableau V.12. ciment ternaire B4 (20% pouzzolane, 15% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,057	
S.S.B (cm ² /g)	4066	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,396
	7 jours	5,465
	28 jours	6,417
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	12,836
	7 jours	32,05
	28 jours	51,092
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (MPa)	23,174	

Tableau V.13. ciment ternaire B5 (15% pouzzolane, 20% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,067	
S.S.B (cm ² /g)	4052	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	3,984
	7 jours	5,887
	28 jours	6,06
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	12,743
	7 jours	32,359
	28 jours	49,686
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (Mpa)	24,356	

Tableau V.14. ciment ternaire B6 (10% pouzzolane, 25% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,078	
S.S.B (cm ² /g)	4038	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,556
	7 jours	7,146
	28 jours	7,617
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	13,2
	7 jours	32,578
	28 jours	58,109
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (MPa)	24,885	

Tableau V.15. ciment ternaire B7 (5% pouzzolane, 30% laitier).

Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,088	
S.S.B (cm ² /g)	4025	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,703
	7 jours	5,95
	28 jours	6,732
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	13,03
	7 jours	32,107
	28 jours	51,534
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (MPa)	24,221	

Tableau V.16. ciment ternaire B8 (0% pouzzolane, 35% laitier).

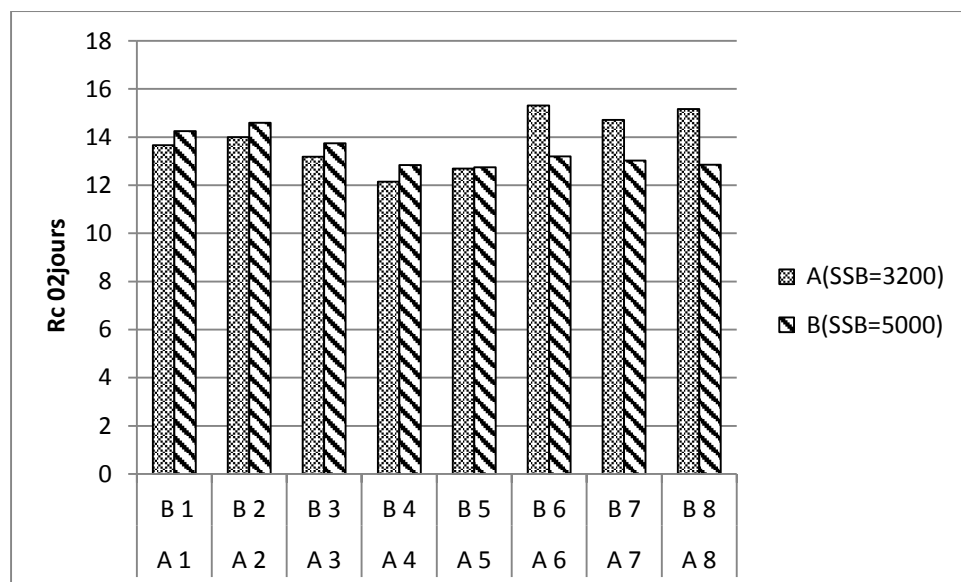
Essais physiques		
M.V.abs(g/cm ³)	3,099	
S.S.B (cm ² /g)	4011	
Essais mécanique		
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4,334
	7 jours	5,278
	28 jours	6,673
Résistance à la Compression (MPa)	2 jours	12,857
	7 jours	31,995
	28 jours	52,049
Résistance à la Compression pour béton(Rc ₂₈) (MPa)	22,417	

V.3. Interprétation des résultats expérimentaux obtenus :

V.3.1. Résistance à la compression :

V.3.1.1. Effet de la surface spécifique de Blaine (S.S.Bcm²/g) :

Les figures (V.1), (V.2), (V.3) montre l'effet de la surface spécifique sur les propriétés mécanique du mortier, nous avons remarqué que les mortiers réalisé a bases des ciments ternaire B (SSB=5000cm²/g), ont une Résistance mécanique Rc₂₈ plus élevé que les ciments A (SSB=3200cm²/g). Et son juste même pour les âges 02jours et 07jours, Donc cette finesse est une caractéristique très importante. Lors de gâchage plus la surface des particules des ciments sont en contact avec l'eau plus l'hydratation est plus au moins rapide et complète.



figV.1 : l'effet de la surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la compression a 02 j.

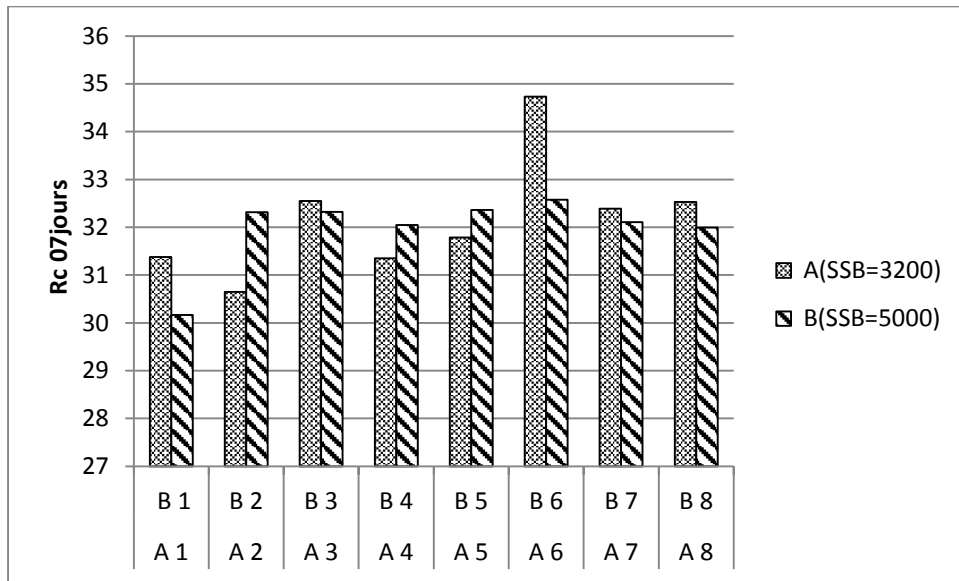


fig.V.2 : l'effet de la surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la compression a 07 j.

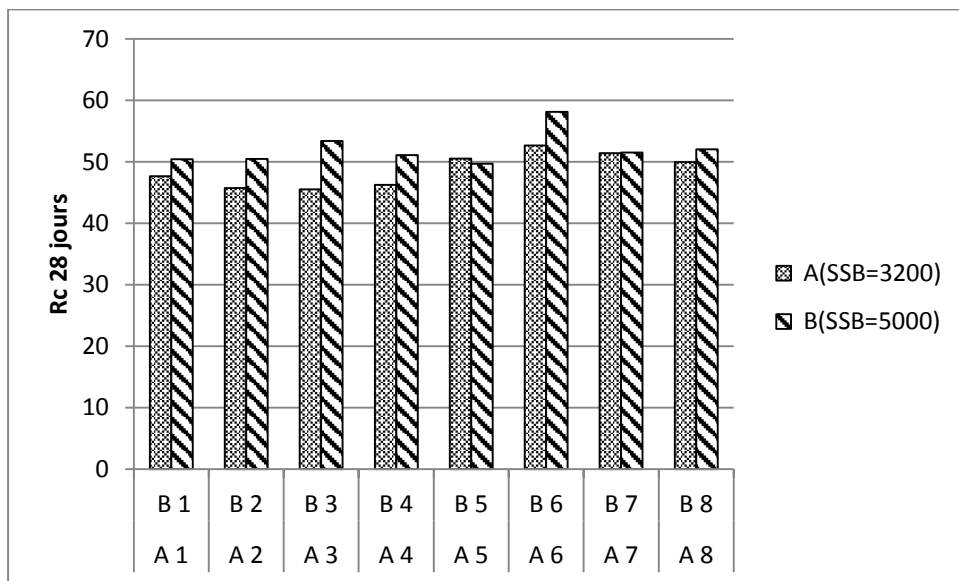


fig.V3 : L'effet de la surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la compression a 28j.

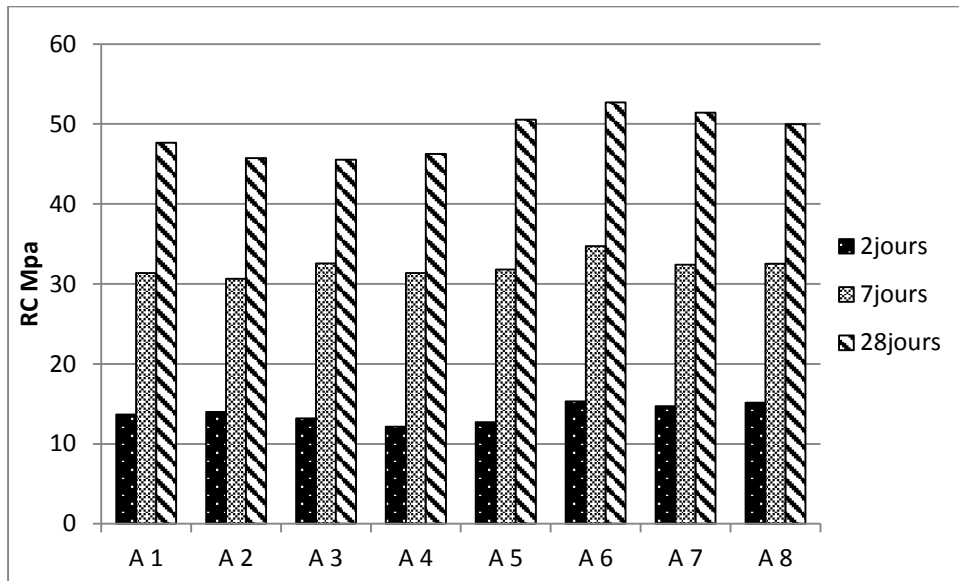


Fig.V4 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la compression Pour les ciments de SSB=3200cm²/g.

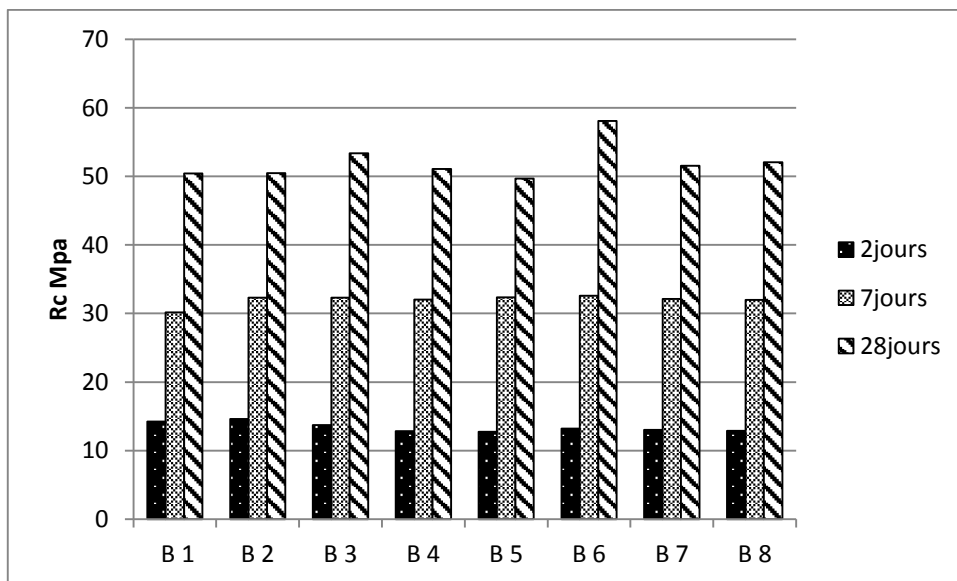


Fig.V5 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la compression Pour les ciments de SSB=5000cm²/g.

V.3.1.2.L'effet du pourcentage et le type d'ajout (pouzzolane, Laitier) sur la résistance mécanique (compression) d'un mortier a base des ciments ternaire:

Les figures V.4 et V.5 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers a base des ciments ternaires contenant différentes dosages de pouzzolane et laitier. D'après ces figures ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui restent toujours légèrement supérieure à celle des mortiers témoin (ciments binaires) et cela à tous les âges surtout à long terme. Cette majoration est beaucoup plus remarquée pour les mélanges (A6, B6) qui contient 10% pouzzolane + 25% laitier.

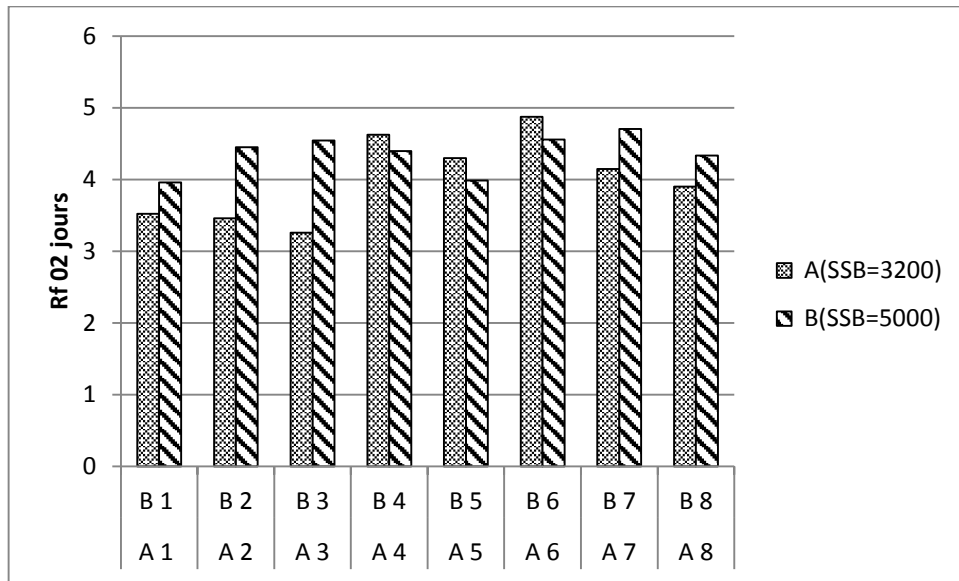
Pour les mélanges (A2, B2) qui contient 30% pouzzolane + 05% laitier nous avons remarqué que les mortiers confectionnés à base des ciments qui contient ces deux taux ont donné les plus petites résistances particulièrement à 28 jours.

Pour les autres mélanges restants nous avons remarqué que les mortiers confectionnés à base des ciments qui contient des taux différents ont donné résistances intermédiaire à tous les âges.

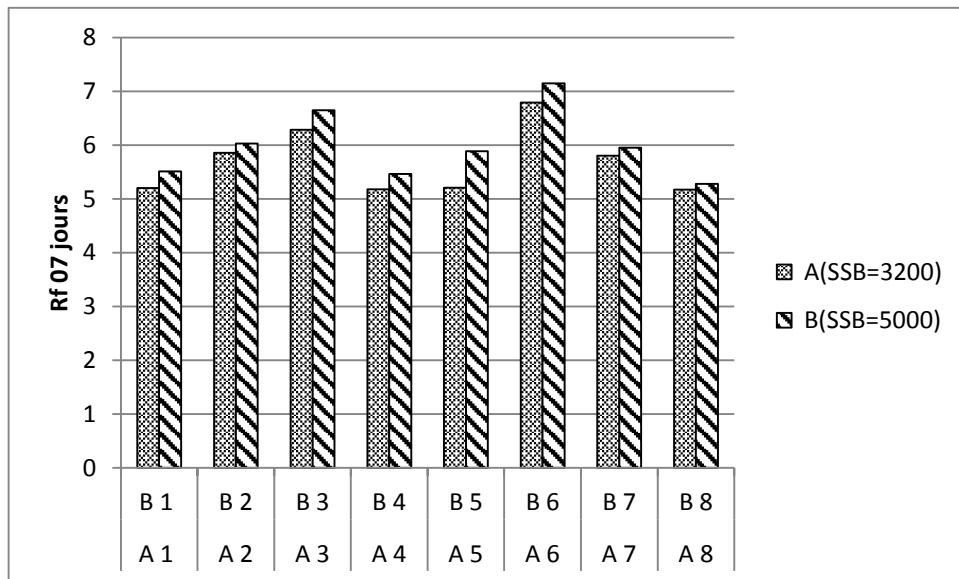
V.3.2.Résistance à la flexion :

V.3.2.1.Effet de la surface spécifique de Blaine (S.S.Bcm²/g) :

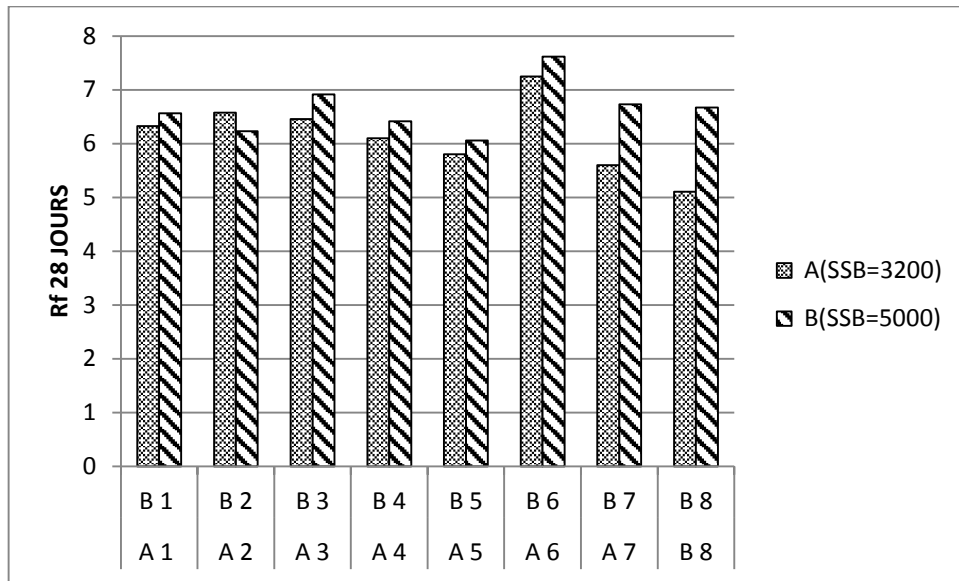
Les figures (V.6), (V.7), (V.8) montre l'effet de la surface spécifique sur les propriétés mécanique du mortier, nous avons remarqué que les mortiers réalisé a bases des ciments ternaire B (SSB=5000), ces derniers elles ont une Résistance mécanique R_{f28} plus élevé que les ciments A (SSB=3200). Et son juste même pour les âges 02jours et 07jours, Donc cette finesse est une caractéristique très importante. Lors de gâchage plus la surface des particules des ciments sont en contact avec l'eau plus l'hydratation est plus au moins rapide et complète.



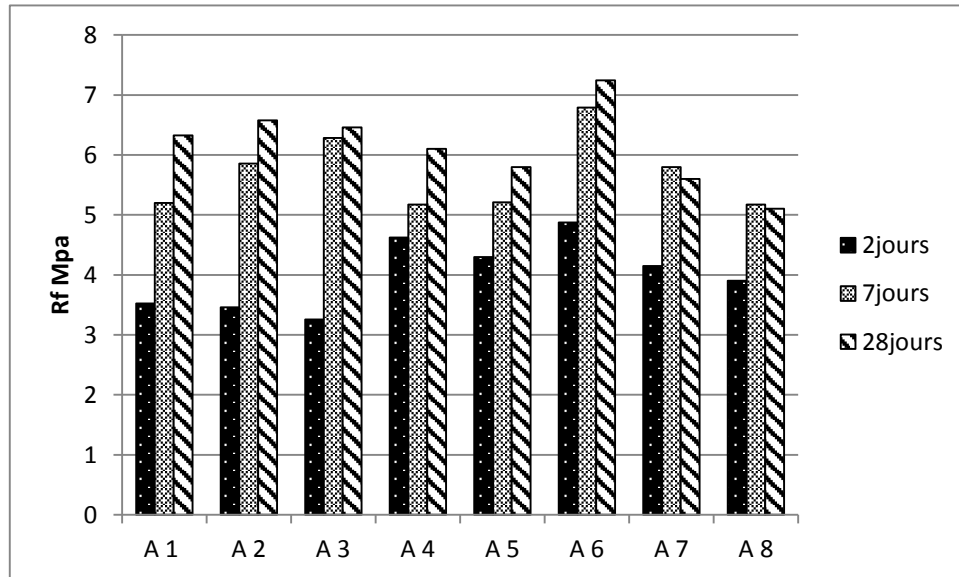
figV.6 : l'effet de la surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la flexion à 02 j.



figV.7 : l'effet de la surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la flexion à 07 j.



figV.8 : l'effet de la surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la flexion à 28 j.



figV.9 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la flexion Pour les ciments de SSB=3200 cm²/g.

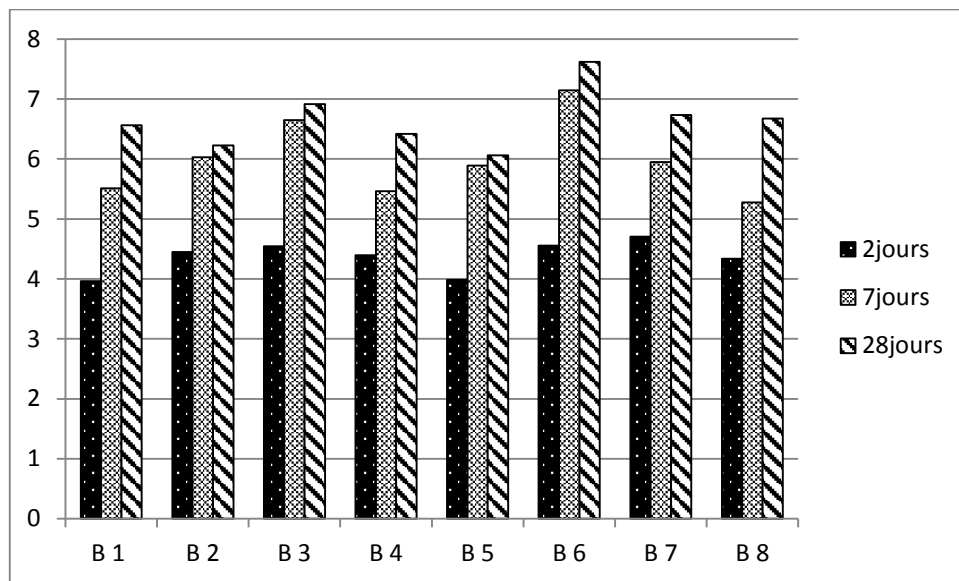


Fig. V.10 : l'effet de la variation de pourcentage d'ajouts sur l'évolution de la résistance à la flexion pour les ciments SSB=5000 cm²/g.

V.3.2.2.L'effet du pourcentage et le type d'ajout (pouzzolane, Laitier) sur la résistance mécanique (flexion) d'un mortier a base des ciments ternaire:

Les figures V.9 et V.10 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers a base des ciments ternaires contenant différentes dosages de pouzzolane et laitier. D'après ces figures ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui restent toujours légèrement supérieure à celle des mortiers témoin (ciments binaires) et cela à tous les âges surtout à long terme. Cette majoration est beaucoup plus remarquable pour les mélanges (A6, B6) qui contient 10% pouzzolane + 25% laitier.

Pour les mélanges (A2, B2) qui contient 30% pouzzolane + 05% laitier nous avons remarqué que les mortiers confectionnés à base des ciments qui contient ces deux taux ont donné les plus petites résistances particulièrement à 28 jours.

Pour les autres mélanges restants nous avons remarqué que les mortiers confectionnés à base des ciments qui contiennent des taux différents ont donné des résistances intermédiaire à tous les âges.

V.3.3. Résistance à la compression pour le béton à base de ciment ternaire :

Dans cette partie nous avons confectionné deux types de béton:

- 1) Béton (A) à base de ciments ternaire d'une $SSB=3200 \text{ cm}^2/\text{g}$ et Sable mixte (40% concassé, 60% dune).
- 2) Béton (B) à base de ciments ternaire d'une $SSB=5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et sable de dune (100%).

D'après les résultats obtenus auparavant (essais de compression) sur mortiers à base des mêmes types de ciments utilisés on peut estimer le mélange qui peut nous donner la meilleure résistance mécanique ; mais après le changement du type de sable (Béton -A- à base de sable mixte 40% concassé, 60% dune), (Béton -B- à base de sable de dune 100%) l'apport de la surface spécifique est devenu insignifiant. Ceci est dû à la correction majeure apportée par le changement du sable qui a corrigé la squelette granulaire et on peut dire même la distribution granulaire au sein du béton à l'état frais et par la suite sur le béton durci ce qui a influé considérablement sur la compacité en diminuant la porosité et par conséquent une résistance mécanique plus élevée.

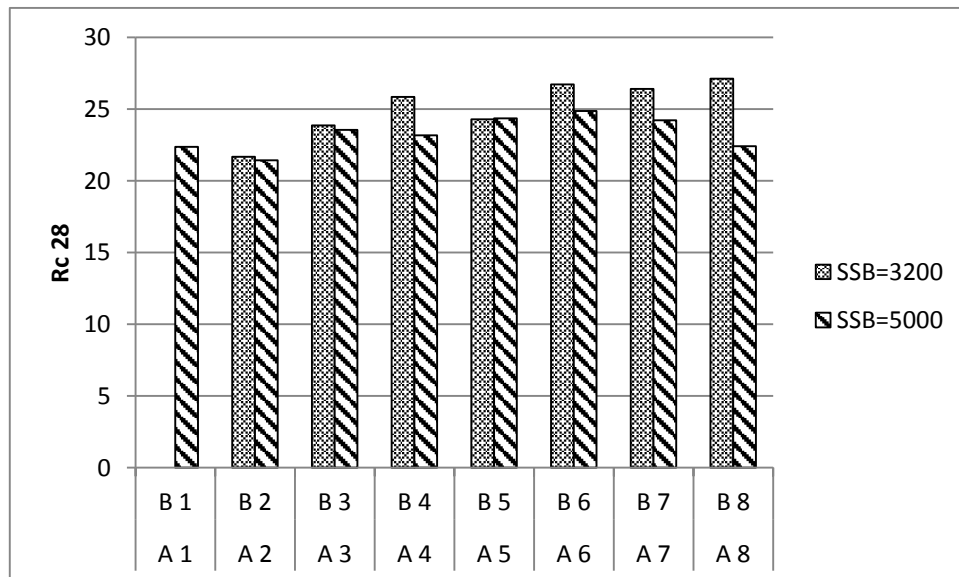


Fig. V.11 : l'effet du pourcentage d'ajouts, qualité de sable et surface spécifique sur l'évolution de la résistance à la compression pour le béton.

V.4. Conclusion :

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation des ajouts minéraux actifs (Pouzzolane – laitier) au ciment CPJ, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques des mortiers ternaires confectionnés selon les différentes combinaisons avec ces ajouts. Ils permettent une amélioration de la résistance mécanique des mortiers qui passe celle du mortier témoin à court et à long terme.

Chapitre VI :

Conclusions générales et
perspectives

Chapitre VI : Conclusions générales et perspectives

VI.1.Introduction :

L'étude entreprise dans ce mémoire, nous indique qu'il est possible d'exploiter les résidus industriels tels que le Laitier d'EL Hadjar, les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane de Béni-Saf et les différents gisements existant en algérie pour produire les ciments ternaires dans notre pays. Ces derniers présentent des intérêts incontestables du point de vue technique, économique, écologique. Cette approche qui consiste à unir divers matériaux cimentaires (ciment Portland artificiel + ajouts) se montre de plus en plus réceptive à la nouvelle façon d'élaborer des bétons et mortiers.

VI.2.conclusion générale :

Les résultats obtenus dans cette recherche peuvent mener aux conclusions générales suivantes :

- Le rôle très important de la surface spécifique de ciment dans la fabrication cimentaire, plus la surface spécifique est élevée plus la résistance de mortier et béton confectionné est importante.

-La possibilité de la préparation d'un sable normalisé locale et de hautes qualités.

- L'utilisation des deux ajouts minéraux dans la composition de ciment CPJ (ciment ternaire) permet d'améliorer les performances mécaniques et d'obtenir une résistance plus élevée à celles des ciments binaire.

- L'incorporation de 10% de pouzzolane et 25% de laitier au clinker permet aux mortiers et bétons de développer une meilleure résistance quel que soit la finesse de mouture, donc c'est le mélange recommandé dans cette étude.

-L'utilisation du sable mixte (40% sable concassé, 60% sable de dune-oued souf) dans la formulation de béton permet d'obtenir des performances mécanique mieux à celles de béton formulé par sable de dune ou concassé seul.

VI.3.Perspectives et recommandations pour des travaux de future :

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivantes :

- Etude de L'influence d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie sur la résistance mécanique des mortiers et bétons.
- Etude de la faisabilité économique de l'utilisation des ciments ternaires dans l'industrie du ciment.
- Etude des effets des ajouts minéraux sur le comportement rhéologique des pâtes, mortiers et bétons.
- Etude de la durabilité des ciments ternaires à court et à long terme.

Références bibliographiques :

[1] M Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition 2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

[2] E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.

[3] J. Baron – JP. Olivier et J.C.Weiss : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles – 806p-1997.

[4] L. PLISKIN : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris 1993.

[5] Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range » - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.

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

[7] Y. Older , « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.

[8] R. Gané « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke –p32-1993.

[9] R. SERSALE, «Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI-

17^{ème} Congrè International de la chimie des ciments -
Volume 1- Partis 1980.

[10] H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.

[11] P.C. AITCIN, C. jolicoeur et J. macgregor, « superplasticizers : how they word and why they accasionnelly don't », concrete international, pp 45-52 – Mai 1994.

[12] P.C. AITCIN«les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton » . Revue des matériaux de construction, pp 185-194 - Mai 1968.

[13] P.C. AITCIN, C., F. Autefage, A. carles-Macgreues., A. Vaquier., « comparative study of the cementitious of différent fly ashe », pp 91-114 - 1994.

[14] B. C. BENI-REMOUR., « Matériaux pouzzolainique: etude physico-chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane », mémoire de fin d'étude ingénieur - IGCM ORAN-

[15] A. BRAHMA « le béton » office des publications universitaires.

[16] FRAHTIA SALAH : l'influence de la concentration des fibres sur l'ouvrabilité de béton de fibre, dirigé par .BEDDAR, MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, juin 2002, page 12.

[17] JF. LATASTE, M. BEHLOUL, D. BREYSSE. Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive, Université Bordeaux 1 – CDGA (GHYMAC) Lafarge,

61 rue Belles feuilles, 75782 Paris Cedex. 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007.

[18] : COURS EN LIGNE, Matériaux de construction, les granulats, Chapitre 3, Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org>

[19] : AMMARI MOHAME et ABDELOUAHAD SIHEM « thèse sur L'effet des fillers de marbres sur la réponse mécanique d'un béton recyclé à base de ciment CRS » Juin 2006.

[20] VITRUVÉ (traduction). – De Architectura. (De l'architecture), Edit. Perrault, Édit. Nizard, Paris 1852 www.archi-med.com/pdf/textes/pouzzolane.pdf.

[21] : J.C.SAINT – ARROMAN, R.DUPAIN « livre : Granulats, Sols, Ciments et Béton » 4e édition actualisée.

[22] : NF EN 206-1 : Norme française partie 1 «béton : spécification, performance, production et conformité ».

[23]: COURS EN LIGNE, Matériaux de construction, le béton, Chapitre 6, Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org>

[24]: COURS EN LIGNE, Matériaux de construction, Les ciments, Chapitre 2, Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org>

[25] : EN 197-1, Norme européenne, partie 1, Liants hydrauliques, Ciments courants: Composition, spécifications et critères de conformité.2001.

[26] : CHRISTOPHE CARDE, «Le retrait des bétons » n°6 Septembre /Octobre 2006.

[27] M. Mamillan. “ Restauration des bâtiments en béton armé” Techniques de l'ingénieur, traité construction, C2III, pp. C2350-1, C2350-14-1993.

[28] F.Adenot “ Durabilité du béton: caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment ” These de doctorat, Université d'Orléans – 1992.

[29] C. Carde R. François et J.M Torrenti. “Leaching of both calcium hydroxyde and C-S-H from cement paste: modelling the mechanical

behaviour”. Cement and Concrete Research, pp 1257-1268-

[30] B. Gerard. “ Contribution des couplages mécanique –chimie-transfert dans la tenue à long terme des ouvrages de stockage des déchets radioactifs. ” Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France et Université Laval, Québec, Canada-1996.

[31] F. Badouix. “ Modélisation de l’altération à long terme des bétons : prise en compte de la carbonatation ” Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France- 2000.

[32] Y. Fujiwara, T. Mayura, E. Owki. “Dégradaation of concrete buried in soil with saline ground water”. Nuclear Engineering and Design, 138, pp143-150-1992.

[33] H. Weigler, S. Karl “ Béton : art der herstellung -eigenschaften” Verlag Ernest and Sohn, Berlin, pp 383-404 – 1989.

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

[35] A. M. Neville “ Propriétés des béton” édition Eyrolles, Paris, pp. 463-506 -2000.

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

[37] K.Hermann “ Substances exerçant une action chimique sur le béton ” Bulletin du ciment 63 (11)

- [38] J.Bai,,BB.Sabir,S.Wild and J.M.Kinuthia “ Strength development in concrete incorporating PFA and metakaolin ” Magazine of Concrete Research – Vol 52– N°03 ,pp153-162- Juin 2000.
- [39] M.I. Khan and C.J. Lynsdale “Strength, permeability and carbonation of high performance concrete”. Cement and Concrete Research – Vol 32, pp 123-131-2002
- [40] I.El Khadiri, A.Diouri A.Boukhari,J. Aride and F.Puertas “Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in moroccan Portland” Cement and Concrete Research – Vol 32 , pp 1597-1603-2002.
- [41] G.Menendez and Al “Strength development of ternary blended cement with limesotone filler and blast furnace slag” Cement and Concrete Research – Vol 25, pp 61-67-2003.
- [42]: THEMEROIL<http://www.themeroil.com>.