



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**Influence de la surface spécifique des ciments
aux ajouts minéraux (calcaire) sur le
comportement mécanique
du mortier.**

Présenté par : Bitar Zeyneb

Dirigé par :

Encadreur: Pr Rahmouni Zine El Abidine

Co- Encadreur : Melle Tebbal Nadia

Promotion : 2015/2016.

DEDICACE

Je suis très heureuse de pouvoir dédier cet humble travail à ceux qui sont les plus chers à mon cœur :

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

A mon père. « Gharbi et Zohra ».

A mes sœurs Hanan. Khoulod. Maha.

A MON CHER FRÈRE : ANES.

A MON CHER AMIE : SLIMAN.

A mes collègues

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des

frères, sœurs et des amis sur qui je peux compter.

je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine

de santé et de bonheur.

Remerciement

Tout d'abord qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers dieu de m'avoir donner le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury, je leur exprime toute ma gratitude.

Je remercie Madame Tebbal .N pour votre patience et votre soutien.

Je voudrais également remercier le professeur M. RAHMOUNI.Z de diriger cette thèse.

Je remercie pareillement l'ensemble des membres du laboratoire de la cimenterie de Lafarge de Hammam El Dalaa.

Sommaire

Résumé

Introduction générale.....	1
Objectifs de l'étude.....	2
Organisation du mémoire	2

CHAPITRE I : LE CIMENT

Introduction	3
I-1 Historique	3
I-2 Définition de ciment	4
I-3 Principe de fabrication des ciments courants	5
I-3-1 Extraction	5
I-3-2 Concassage	6
I-3-3 Préparation du cru	6
I-3-3-1 Préhomogénéisation	7
I-3-3-2 Broyage-séchage	7
I-3-3-3 Séparation	7
I-3-3-4 Homogénéisation	7
I-3-4 Cuisson	7
I-3-5 Refroidissement	7
I-3-6 Broyage	8
I-3-7 Stockage, Ensachage et Expédition	8
I-4 Les Constituants principaux du ciment et les additions	8
I-4-1 Le clinker	8
I-4-1-1 Composition chimique	8
I-4-1-2 Composition minéralogique	9
I-4-2 Le gypse(CaSO_4)	9
I-4-3 Les ajouts minéraux:.....	10
I-4-3-1 Le calcaire	10
I-4-3-2 Laitier de haut fourneau	10
I-4-3-3 Les cendres volantes	10

I-5 Principales catégories de ciments	11
I-5-1 Classification selon les compositions	11
I-5-2 Classification selon la résistance	11
I-6 Hydratation du ciment portland	13
I-6-1 Introduction	13
I-6-2 Hydratation des composants du ciment portland.....	14
I-6-2-1 Hydratation du silicate tricalcique C_3S	14
I-6-2-2- Hydratation du silicate bi calcique C_2S	15
I-6-2-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A	15
I-6-2-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF	16
I-6-2-5 Conclusion	17
I-7 Les caractéristiques du ciment portland	17
I-7-1 La prise (NA230 NF EN 196-3)	17
I-7-2 Le durcissement	20
I-7-3 La finesse de mouture (finesse de Blaine - NA231 NF EN196-6)	22
I-7-4 Le retrait (NA440 NF P15 433)	24
I-7-5 Chaleur d'hydratation (EN196-9 NF P15-436)	25
I-7-6 Stabilité de volume	27
I-7-7 Résistance à la compression (NA 234 EN 196-1)	27
Conclusion	28

Chapitre II: les ajouts minéraux

Introduction	29
II-1 Définition des ajouts cimentaires	29
II-2 Définition des caractéristiques des additions	29
II-3 Classification des ajouts minéraux dans le ciment Portland	30
II-3-1 Principaux ajouts minéraux inertes	30
II-3-1-1 Les calcaires (L).....	31
II-3-1-2 Schistes calcinés :.....	32
II-3-2 Principaux ajouts minéraux actifs	33
II-3-2-1 Laitier granulé de haut-fourneau (S).....	33
II-3-2-2 La pouzzolane	33
II-3-2-3 Les fumées de silice (D).....	35
II-3-2-4 Cendres volantes	36

II-4 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux lors de la fabrication des ciments Portland	
II-4-1 Intérêt du point de vue technique	36
II-4-2 Intérêt du point de vue économique	37
II-5-3 Intérêt du point de vue environnemental	37
II-5 Utilisation des additions minérales en Algérie	37
Conclusion	38

Chapitre III : Les mortiers

Introduction	39
III-1 Composition du mortier	39
III-2 Les différents types de mortiers	42
III-2-1 Les mortiers de ciment	42
III-2-2 Les mortiers de chaux	42
III-2-3 Les mortiers bâtards	42
III-2-4 Les mortiers fabriqués sur chantier	42
III-2-5 Le mortier industriel	43
III-3 Classification des mortiers	43
III-3-1 Classification générale des mortiers	43
III-4 Caractéristiques principales	44
Conclusion	44

Chapitre IV : Caractéristiques des matériaux utilisés

Introduction	45
IV-1 Matières Premières	45
IV-1-1 Le clinker	45
IV-1-1-1 Composition chimique du clinker	46
IV-1-1-2 Composition minéralogique du clinker	46
IV-1-2 Le gypse	47
IV-1-2-1 Composition chimique :	47
IV-1-2-2 Composition minéralogique du gypse :	47
IV-1-3 Fillers calcaires	47
IV-1-3-1 Composition chimique du calcaire	48
IV-1-3-2 Composition minéralogique du calcaire	48
IV-2 Formulation des ciments	48
IV-2-1 Procède de préparation des différents ciments	48
IV-2-2 Composition pondérale des ciments préparés	49
IV-2-3 Analyses chimiques des ciments préparés	49
IV-3 Formulation des mortiers normalisés	49
IV-3-1 Sable normalisé «EN 196-1»	49
IV-3-2 L'eau de gâchage	51
IV-4 Méthodes d'essais	51
IV-4-1 Essai sur ciment anhydre	52

IV-4-1-1 La masse volumique absolue	52
IV-4-1-2 Mesure de la finesse du ciment	53
IV-4-1-3 Analyse granulométrique (Méthode alpine)	55
IV-4-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment)	58
IV-4-2-1 Essai de consistance.....	58
IV-4-2-2 Essais de prise.....	60
IV-4-2-3 Essai de stabilité	61
IV-4-3 Essais sur mortiers	63
IV-4-3-1 Mortier normalisé	63
IV-4-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques	63
IV-4-3-3 Mesure du retrait sur éprouvette de mortier normale	66
IV-4-3-4 La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique)	68
IV-4-3-5 Résistances à la compression	70
Conclusion	74

Chapitre V : Résultats et Interprétation

Introduction	75
V-1 Influence de la finesse sur le poids spécifique des ciments	75
V-2 Analyse granulométrique par la méthode alpine	76
V-2-1 La relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques	76
V-3 Influence de la finesse sur la pate des ciments	78
V-3-1 Influence de la finesse du ciment sur la consistance	78
V-3-2 Influence de la finesse du ciment sur la prise	79
V-4 Influence de la finesse du ciment sur la stabilité	81
V-5 Influence de la finesse sur le mortier normale	82
V-5-1 Influence de la finesse du ciment sur le retrait et le gonflement :	82
V-6 Comportement mécanique du mortier à base de sable normalisé	84
V-6-1 Influence de la finesse du ciment sur la résistance mécanique du mortier	85
V-7 Influence de la finesse du ciment sur la chaleur d'hydratation	86
V-8 Effet du la chaleur d'hydratation sur le temps de prise	88
Conclusion	88
Conclusion générale	89

LISTE DES TABLEAUX

<i>N° de Tableau</i>	<i>Intitulé</i>	<i>N° de Page</i>
Tableau I-1	Composition chimique du clinker.	8
Tableau I-2	Compositions minéralogiques moyenne du clinker.	9
Tableau I-3	Principales catégories de ciment.	11
Tableau I-4	Classes de résistance à la compression des ciments.	12
Tableau I-5	Les anhydres et les hydrates de ciment.	13
Tableau I-6	Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.	26
Tableau II-1	Classification des ajouts selon leur réactivité.	30
Tableau II-2	Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes.	38
Tableau III-1	Différentes actions des adjuvants.	41
Tableau IV-1	Constituants principaux du cru de clinker.	45
Tableau IV-2	Composition chimique du clinker.	46
Tableau IV-3	Composition minéralogique des clinkers.	46
Tableau IV-4	Composition chimique du gypse.	47
Tableau IV-5	Composition minéralogique du gypse.	47
Tableau IV-6	Composition chimique du calcaire.	48
Tableau IV-7	Composition minéralogique du calcaire.	48
Tableau IV-8	Compositions pondérales deux ciments préparés.	49
Tableau IV-9	Composition chimique des ciments préparés.	49
Tableau IV-10	Analyse granulométrique de sable normalisé.	50
Tableau IV-11	SSB de différent ciment préparé.	55
Tableau IV-12	Caractéristiques de la granulométrie (Refus 45 & 90µm) des différents ciments.	57
Tableau IV-13	Résultats des essais sur le ciment CEM II/B.	71
Tableau IV-14	Résultats des essais sur le mortier.	72
Tableau IV-15	Résultats des essais sur le ciment CEM II/A.	73
Tableau IV-16	Résultats des essais sur le mortier.	74

LISTE DES FIGURES

N° de Figures	<i>Intitulé</i>	N° de page
Figure I-1	Fabrication du ciment.	5
Figure I-2	CSH fibreux avec cristal de portlandite (X) entre des CSH (#), la porosité est repérée par (O).	15
Figure I-3	Microscopie électronique à balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.	16
Figure I-4	Détermination du temps de début de prise.	17
Figure I-5	Détermination du temps de fin de prise.	18
Figure I-6	Evolution du temps de prise en fonction de la température.	19
Figure I-7	Influence de la température sur la prise des ciments.	19
Figure I-8	Influence du E/C sur le temps de prise.	19
Figure I-9	Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA.	20
Figure I-10	L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.	21
Figure I-11	Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.	23
Figure I-12	Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.	23
Figure I-13	Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers.	25
Figure I-14	Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.	27
Figure I-15	Résistance du mortier normal.	28
Figure II-1	Le calcaire.	31
Figure II-2	la pouzzolane.	33
Figure II-3	Fumée de silice.	35
Figure II-4	Cendre volante.	36
Figure IV-1	Sable normalisé.	50
Figure IV-2	Distillateur (Lafarge laboratoire).	51
Figure IV-3	Condition de laboratoire (Lafarge laboratoire).	52
Figure IV-4	Flasque Le chatelier.	53
Figure IV-5	Le densimètre manuel.	55
Figure IV-6	Tamiseuse alpine (Laboratoire de lafarge M'sila).	56
Figure IV-7	Appareil de vicat manuel.	59
Figure IV-8	L'appareil de vicat.	61
Figure IV-9	Les aiguillé de chatelier dans armoire.	62

Figure IV-10	Les aiguillé de chatelier.	62
Figure IV-11	Le bouilloire de chatelier.	63
Figure IV-12	Malaxeur semi-automatique de mortier (Laboratoire de lafarge M'sila).	63
Figure IV-13	Eprouvette prismatique (4x4x16) cm ³ (Laboratoire de lafarge M'sila).	63
Figure IV-14	Table à choc (Laboratoire de lafarge M'sila).	64
Figure IV-15	Armoire humide.	64
Figure IV-16	Démoulage des éprouvettes.	65
Figure IV-17	Conservation des éprouvettes dans l'eau.	65
Figure IV-18	Machine de compression.	66
Figure IV-19	Comparateur de retrait (Laboratoire de lafarge M'sila).	67
Figure IV-20	Calorimètre langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila).	68
Figure IV-21	Résistance à la compression.	70
Figure V-1	Variation du poids spécifique du ciment type II/B et II/A en fonction de la finesse de mouture.	75
Figure V-2	Variation du poids spécifique du ciment type II/B et II/A en fonction de la finesse de mouture.	76
Figure V-3	Effet de la surface spécifique sur l'analyse granulométriques (ALPINE) du ciment type II/B et II/A.	77
Figure V-4	Effet de la surface spécifique sur l'analyse granulométriques du ciment type II/B et II/A (ALPINE).	77
Figure V-5	Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment type II/B II/A en fonction de la finesse de mouture	78
Figure V-6	Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment type II/A et II/B en fonction de la finesse de mouture.	79
Figure V-7	Evolution du temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment (type II/B et II/A) en fonction de la finesse de mouture.	80
Figure V-8	Evolution du temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment (type II/B et II/A) en fonction de la finesse de mouture.	80
Figure V-9	Evolution de l'expansion du ciment type II/B et II/A en fonction de la finesse de mouture.	81
Figure V-10	Evolution de l'expansion du ciment type II/A et II/B en fonction de la finesse de mouture.	81
Figure V-11	Evolution du retrait du mortier en fonction de la finesse de mouture.	83
Figure V-12	Evolution du retrait du mortier en fonction de la finesse de mouture.	83
Figure V-13	Evolution du gonflement du mortier en fonction de la finesse de mouture	84
Figure V-14	Evolution du gonflement du mortier en fonction de la finesse de mouture.	84
Figure V-15	Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture	85
Figure V-16	Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture	86

Figure V-17	Evolution de la chaleur d'hydratation des mortiers en fonction de la finesse de mouture	87
Figure V-18	Evolution de la chaleur d'hydratation des mortiers en fonction de la finesse de mouture.	87
Figure V-19	Evolution de la chaleur d'hydratation des mortiers et temps de prise en fonction de la finesse de mouture.	88

Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier

RESUME :

Les ajouts minéraux font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques et chimiques (durabilité) des matériaux cimentaires (mortier et béton).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, poids spécifique, finesse, consistance des pâtes de ciment, chaleur d'hydratation, la stabilité et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de la surface spécifique et la composition (chimique et minéralogique) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement des résistances mécaniques des mortiers.

Mots-clés : Finesse (surface spécifique), ajouts minéraux (calcaire), ciment, mortier, résistance mécanique.

تأثير المساحة السطحية للإسمنت ذات الإضافات المعدنية (الحجر الجيري) على مقاومة المونة

ملخص:

إن تدعيم استعمال الإضافات الإسمنتية هي حالياً جزء من التطورات الأخيرة في إنتاج الاسمنت مما أدى إلى تحسن كبير للخصائص الميكانيكية للمواد الإسمنتية (الخرسانة و المونة). وعلاوة على ذلك، إن استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية.

إن الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للإسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة في الحالة الجافة و المبللة (التركيب الكيميائي، الوزن النوعي، النعومة، القوام القياسي للعجينة الاسمنتية ، زمن التصلب) وكذلك مميزات المونة في حالة تصلد منها التقلص الانتفاخ تم تحديدها خلال هذه الدراسة.

من خلال النتائج التجريبية المحصل عليها نستنتج أن الزيادة في النعومة (المساحة السطحية النوعية) وكذلك التركيب الكيميائي والمعدني للإسمنت ذات الإضافات المعدنية يمثلان السبب الرئيسي في تحسين التفاعل البطيء لإضافات المعدنية وزيادة المقاومة الميكانيكية للمونة.

مفاتيح :

المساحة النوعية السطحية (النعومة), الإضافات المعدنية (الحجر الجيري), الاسمنت, المونة, المقاومة الميكانيكية .

Influence on facespecific of cements to the mineral additions (limestone) on the mechanical behavior of the mortar

Abstract

The mineral additions currently form part of the most recent developments in the production of cement, because their uses make a improvement of the mechanical properties and chemical (durability) of cementing materials (mortar and concrete).

In addition their uses aim to reduce the clinker consumption, while contributing in a way simple and economic to solve the problems involved in the environment.

The physicochemical properties of cement in an anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, unit weight, smoothness, consistency of the cement pastes, heat of hydration and time of catch), as well as the characteristics of the mortars ready-mixed at their bases, such as, the withdrawal, swelling, the mechanical behavior (mechanical resistances to compression) were studied.

According to the experimental results obtained, it arises that the increase in surface specific and the composition (chemical and mineralogical) of cements to the mineral additions are the principal persons in charge with the improvement of the latent reactivity of the mineral additions and the increase in the mechanical resistances of the mortars.

Key words: Smoothness (specific surface), additions mineral (limestone), cement, mortar, mechanical resistance.

Introduction Générale

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portlands composés (CEM II) a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments aux ajouts minéraux avec les propriétés physico-mécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la fabrication des ciments avec additions minérales dans le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CEM II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

La contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : physique et chimique. D'une part les additions minérales sont susceptibles de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, certaines additions minérales à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent peuvent réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés. Ces deux effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances finales des matériaux durcis.

Le ciment portland composé (CEM II) avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (CEM II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique).

Notre étude consiste à suivre l'évolution de la résistance à la compression d'un mortier avec différent pourcentage de calcaire en fonction de la finesse.

Introduction générale

Objectifs de l'étude :

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la finesse (surface spécifique) des ciments avec ajout minérale sur la résistance mécanique du mortier. Ce travail est une contribution à l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques d'un mortier par l'augmentation de la surface spécifique afin d'atteindre des valeurs optimales en utilisant deux types de ciments (CEM II/B et CEM II/A).

Organisation du mémoire :

Notre mémoire est structuré en une introduction générale, cinq chapitres et une conclusion générale,

- **Introduction générale.**
- **Le premier chapitre :** une recherche bibliographique sur le ciment portland et ses propriétés.
- **Le deuxième chapitre :** une recherche bibliographique sur les notions générales des ajouts minéraux.
- **Le troisième chapitre :** une recherche bibliographique sur la formulation des mortiers.
- **Le quatrième chapitre :** est consacré à l'étude expérimentale. Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques des matériaux utilisés (calcaire, clinker, gypse) et les méthodes d'essais réalisés sur les ciments préparés et les mortiers.
- **Le cinquième chapitre :** Contient l'interprétation des résultats des essais obtenus. Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LE
CIMENT

Chapitre I : Généralités sur le ciment

Introduction:

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

[1]

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

Le durcissement hydraulique du ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates. Dans les ciments, la somme des quantités relatives d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit représenter une proportion au moins égale à 50 % en masse, dans les ciments.

Les ciments sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène du fait d'une assurance qualité couvrant les processus de production et de manutention. [2]

I-1 Historique :

Le ciment aurait d'abord été inventé par les Égyptiens, qui a été améliorée par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à de l'argile. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage a été repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée à des adjuvants comme les tuiles ou briques concassées, dont l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIX^e siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques, ou chaux limites, en 1840.

La recherche sur l'hydraulicité des chaux débuta à la fin du XVIIIe siècle pour aboutir vers 1840, à la fabrication des ciments modernes. Elle concernait les chaux grasses, non hydrauliques, qui ne durcissent pas sous l'eau, les chaux hydrauliques qui durcissent même sous l'eau, les chaux éminemment hydrauliques (riches en argiles) qui se solidifient très rapidement, et les chaux limites (trop riches en argiles) qui se solidifient très rapidement puis se décomposent, si elles ne sont pas cuites au degré de fusion pâteuse. [3]

En 1796, James Parker découvrit sur l'Île de Sheppey, en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900 °C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptisa commercialement ciment romain. Ce ciment acquit par la suite, de 1820 à 1920 environ, une grande réputation. Il fut fabriqué dans toute l'Europe et servait à faire des moulages au gabarit, ou à fabriquer des pierres artificielles de ciment moulé. Au début du XIXe siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux britanniques ni à la pouzzolane italienne. Et le français Louis Vicat découvrit en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux (concernant la proportion d'argile et la température de cuisson) et publia ses travaux sans prendre de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin déposa un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appela commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemblait aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche. C'est un ciment similaire à ceux que décrivit Vicat, encore que son brevet soit imprécis. Mais il fallut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits aujourd'hui ciments Portland) toujours par Louis Vicat (une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker) pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes, et voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé.

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire à produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement. [4,5]

I-2 Définition de ciment :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux. [6]

I-3 Principe de fabrication des ciments courants :

Sans vouloir entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est cependant nécessaire d'en connaître les principes généraux et les différentes phases.

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

Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 nécessaires au processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésie MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalis K_2O et Na_2O_3 , dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises. [7]

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

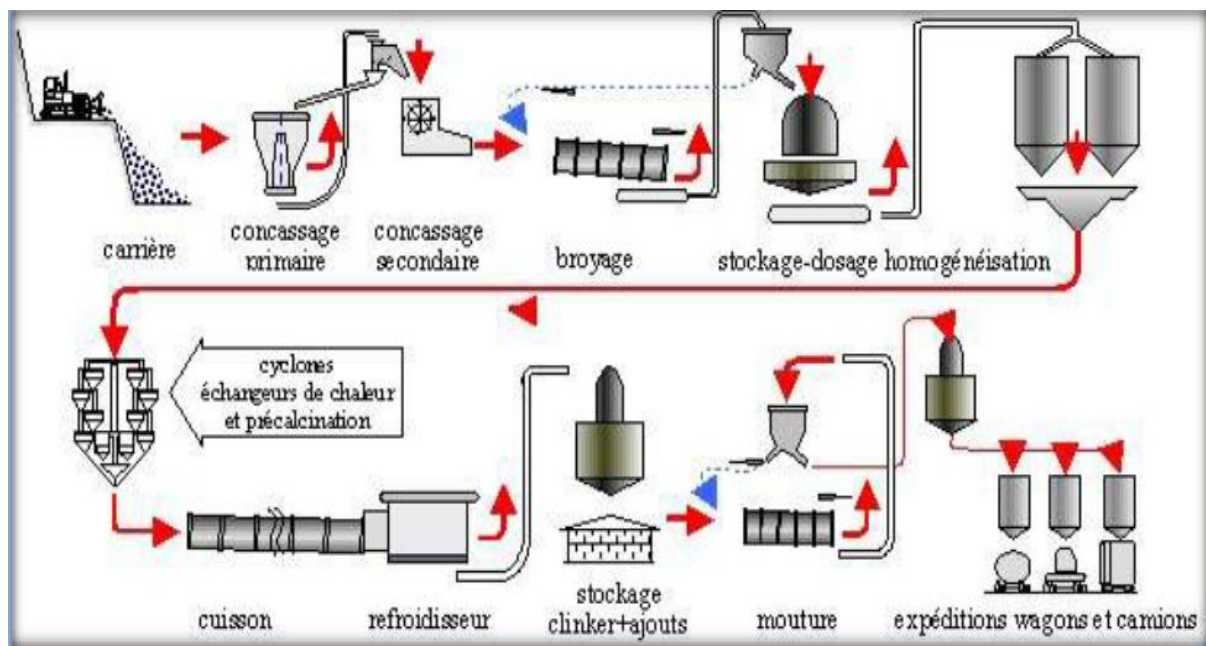


Figure I -1 : Fabrication du ciment. [8]

I-3-1 Extraction :

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

I-3-2 Concassage :

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

I-3-3 Préparation du cru :

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

- 65 % de CaO fourchette de 60 à 69 % ;
- 21 % de SiO₂ fourchette de 18 à 24 % ;
- 6 % de Al₂O₃ fourchette de 4 à 8 % ;
- 3 % de Fe₂O₃ fourchette de 1 à 8 % ;
- 2 % de MgO fourchette de 0 à 5 % maximum ;
- 1 % d'alcalis fourchette de 0 à 2 % maximum ;
- 1 % de SO₃ fourchette de 0 à 3 % maximum.

Ces proportions permettant de prévoir certaines des qualités ultérieures du ciment.

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

- la voie sèche, la plus généralement utilisée en France dont nous résumons les phases aux paragraphes I-3-3-1 à I-3-3-4;
- la voie humide, pratiquement abandonnée en France parce que grande consommatrice d'énergie et qui consiste à préparer une pâte dans des délayeurs, pâte qui est ensuite homogénéisée et stockée. Cette voie s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevé ;
- la voie semi-sèche qui consiste à humidifier la poudre obtenue après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules qui sont ensuite cuits sur une grille mobile ;
- la voie semi-humide qui consiste à filtrer la pâte réalisée de façon analogue à la voie humide mais, après filtration, à en faire des boudins qui sont ensuite cuits sur une grille.

La fabrication par voie sèche, comporte les phases suivantes :

I-3-3-1 Préhomogénéisation :

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

I-3-3-2 Broyage-séchage :

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

I-3-3-3 Séparation :

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

I-3-3-4 Homogénéisation :

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

I-3-4 Cuisson :

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (de 150 m dans le procédé par voie humide), à une température comprise entre 1400 et 1500 °C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant ;
- la décomposition des argiles qui se situe au-dessus de 500°C;
- la décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000°C ;
- la formation du clinker ou clinkérisation à 1450 °C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur. [7]

I-3-5 Refroidissement :

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

I-3-6 Broyage :

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

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

I-3-7 Stockage, Ensachage et Expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30 % de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches. [7]

I-4 Les Constituants principaux du ciment et les additions :**I-4-1 Le clinker :**

Le clinker est le principal constituant des ciments courants. C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) vers 1450 °C d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire (80 % environ) et d'argile (20 % environ). [9]

I-4-1-1 Composition chimique :

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux : l'oxyde de calcium (CaO), de silicium (SiO₂), d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃), représentant environ 95 % en masse.

La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau I-1.

Composants du clinker	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Notation cimentière	C	A	F	S	M	S	K	N
Teneurs limites (%)	62-67	2-9	1-5	19-25	0-3	1-3	0,6	0,6

Tableau I-1 : Composition chimique du clinker. [10]

I-4-1-2 Composition minéralogique :

Le ciment portland contient 4 principaux constituants sont :

- le silicate bicalcique (Bélite): $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C_2S ,
- le silicate tricalcique(Alite) : 3CaO SiO_2 ou par abréviation C_3S ,
- L'aluminate tricalcique (Célite): $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C_3A ,
- L'alumino-ferrite tétracalcique(Célite) : $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C_4AF .

La composition minéralogique moyenne du clinker est comprise dans les limites suivantes (tableau I-2). [11]

Composants minéralogiques	Alite C_3S	Bélite C_2S	Célite C_3A	Célite C_4AF
Teneur en (%)	40 à 70%	10 à 30%	2 à 15%	0 à 15%

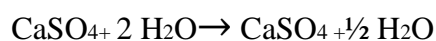
Tableau I-2 : Compositions minéralogiques moyenne du clinker. [11]

I-4-2 Le gypse(CaSO_4) :

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité **2.3**. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$). Le gypse est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement. [12]

Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment.



I-4-3 Les ajouts minéraux :

D'après leur composition, les ajouts minéraux contiennent principalement de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker.

I-4-3-1 Le calcaire :

Les calcaires sont des roches sédimentaires, troisièmes par ordre d'abondance après les schistes et les grès, facilement solubles dans l'eau, composées majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 .

- Le filler calcaire en général conduit à une augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment et par conséquence :

À une diminution du début de prise.

À une augmentation des résistances initiales.

- La finesse du filler contrôle ce mécanisme.

- Le filler calcaire va réagir avec les produits d'hydratation du ciment, en se formant des carboaluminates de calcium au lieu de monosulfoaluminate, ce qui permet d'avoir d'ettringite à long terme.

I-4-3-2 Laitier de haut fourneau :

C'est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il se présente en forme angulaire et vitreuses. Broyé finement, il est utilisé jusqu'à 50% du poids du ciment.[13]

I-4-3-3 Les cendres volantes :

Ce sont les fines poussières récupérées lors de la combustion du charbon des centrales thermiques. Elles se présentent sous formes de particules sphériques pleines de creuses ayant le diamètre d'un grain de ciment. Leurs dosage varient entre 30 et 50% par rapport à la masse du ciment.

- Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes [9] :
- **des propriétés hydrauliques** : par réaction avec l'eau, ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau,
 - **des propriétés pouzzolaniques** : ils peuvent former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables (combinaison à T° ordinaire de la chaux avec de l'eau : formation lente des constituants analogues à ceux du clinker et composés hydratés),
 - **des propriétés physiques** : améliorant certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité . . .).

I-5 Principales catégories de ciments:

I-5-1 Classification selon les compositions :

D'après la norme ENV 197-1 définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme au Tableau. [14]

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

Tableau I-3 : Principales catégories de ciment. [14]

I-5-2 Classification selon la résistance :

C'est la norme **NF EN 196-1** qui permet de déterminer la résistance mécanique d'un ciment, mesurée en fait par des essais de compressions sur des éprouvettes de mortier. Cette résistance augmente avec le temps depuis le début de la prise : elle est mesurée à 2 jours, 7 jours et 28 jours. Les résistances à 2 et 7 jours sont les résistances à court terme R_{C2} , R_{C7} et la résistance à 28 jours est la résistance courante R_{C28} . Le tableau permet de retrouver les résistances à attendre (en mégapascals) selon les désignations employées. [15]

Classe	R_{C2} (Mpa)	R_{C7} (Mpa)	R_{C28} (Mpa)	R_{C28} <i>maxi</i> (Mpa)
32.5N	-	16(minimum14)	32.5 (minimum30)	52.5
32.5R	10(minimum8)	-		
42.5N	10(minimum8)	-	42.5 (minimum40)	62.5
42.5R	20(minimum18)	-		
52.5N	20(minimum18)	-	52.5 (minimum50)	-

Tableau I-4 : Classes de résistance à la compression des ciments. [15]

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R). Pour les ciments de classe de résistance 32,5 et 42,5 une valeur maximale de la résistance à 28 jours est fixée.

I-6 Hydratation du ciment portland :**I-6-1 Introduction :**

Le ciment est un liant hydraulique: il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [16]:

- La dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
- La formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates.
- La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides inters granulaires.

L'hydratation du ciment fait intervenir les réactions de ses constituants avec l'eau de gâchage.

Les anhydres du ciment vont réagir avec l'eau du gâchage pour former des hydrates. Ces anhydres se sont principaux minéraux de clinker purs cités auparavant.

Les anhydres et les hydrates cités dans ce paragraphe sont résumés dans le tableau (I-5) ci-dessous:

Notation Abrégée	Formule Chimique en oxyde	dénomination
C_3S	$(CaO)_3-SiO_2$	Silicate tricalcique
C_2S	$(CaO)_2-SiO_2$	Silicate bicalcique
C_3A	$(CaO)_3-Al_2O_3$	Aluminate tricalcique
C_4AF	$(CaO)_4-Al_2O_3-Fe_2O_3$	Aluminoferrite tétracalcique
CH	$Ca(OH)_2$	Portlandite
$C-S-H$	$(CaO)_x-SiO_2-(H_2O)_y$	Silicate de calcium hydraté
$C_3A.(C\bar{S})_3.H_{32}$	$(CaO)_6-Al_2O_3-(SO_3)_3-(H_2O)_{32}$	Ettringite
$C_3A.(C\bar{S}).H_{12}$	$(CaO)_6-Al_2O_3-(SO_3)-(H_2O)_{12}$	Monosulfoaluminate de calcium hydrate

Tableau I-5: Les anhydres et les hydrates de ciment. [17]

I-6-2 Hydratation des composants du ciment portland :

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 – 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul. La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

La période d'induction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment.

Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

I-6-2-1 Hydratation du silicate tricalcique C₃S :

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C₃S avec de l'eau est la suivante:



Où { CSH représente le 3CaO. 2SiO₂. 3H₂O (Silicate de calcium hydraté) et
CH représente le Ca(OH)₂ (Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S (figure 1.2) sont:

- les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g). La cohésion des feuillets de CSH est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales
- l'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate. [18]

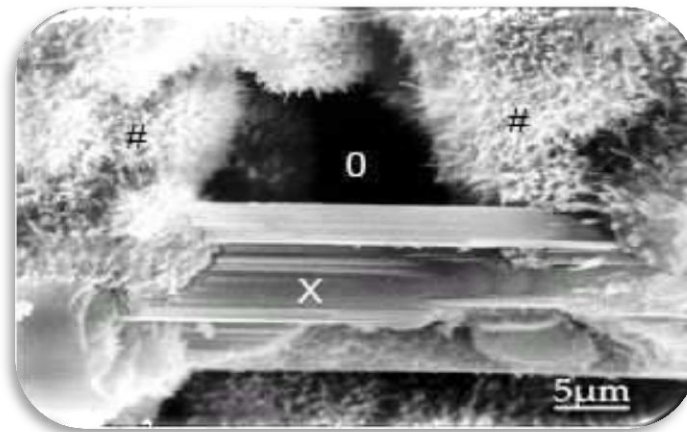


Figure I-2: CSH fibreux avec cristal de portlandite (X) entre des CSH (#), la porosité est repérée par (O). [19]

I-6-2-2- Hydratation du silicate bi calcique C_2S :

Une fois hydraté, C_2S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:

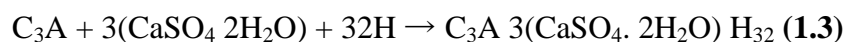


Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C_3S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stoechiométrie.

L'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

I-6-2-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). En l'absence du gypse, la réaction de C_3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C_3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure I-3). La réaction est donnée par:



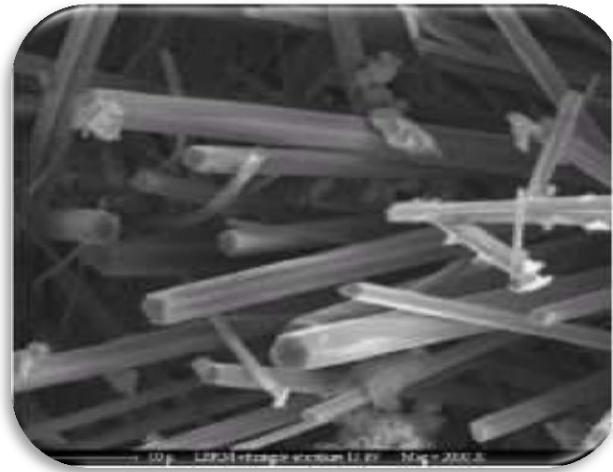
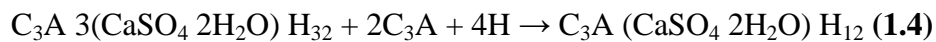


Figure I-3: Microscopie électronique à balayage, ettringite aciculaire dans un béton [20].

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales. [13]

La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée. [22]

I-6-2-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF :

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance. [18]

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I-6-2-5 Conclusion:

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

I-7 Les caractéristiques du ciment portland :**I-7-1 La prise (NA230 NF EN 196-3) :**

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.



Figure I-4: Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure I-4).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau (voir figure I-5).

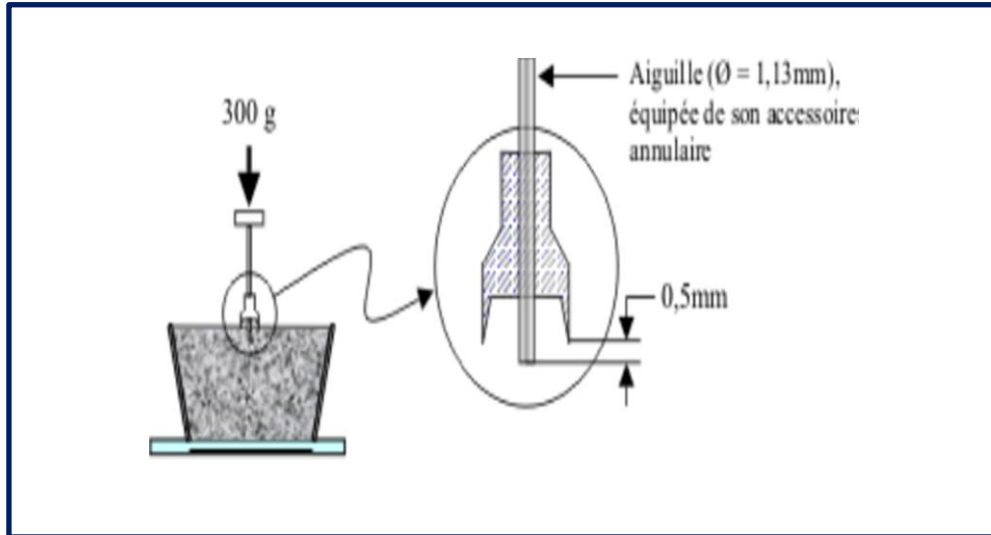


Figure I-5: Détermination du temps de fin de prise.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- la nature du ciment
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court.
- la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C (figure I-6),
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,
- l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (figure I-8).

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de:

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

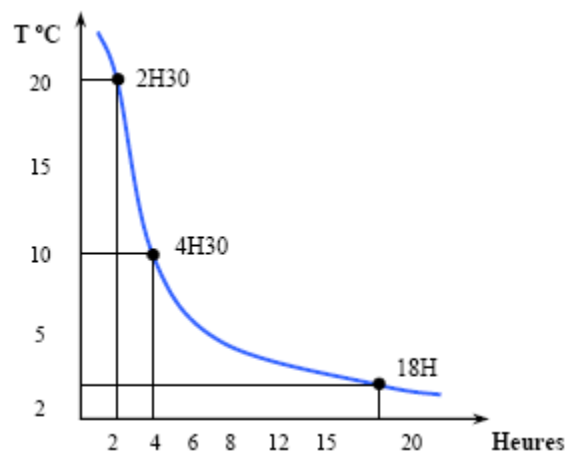


Figure I-6 : Evolution du temps de prise en fonction de la température.

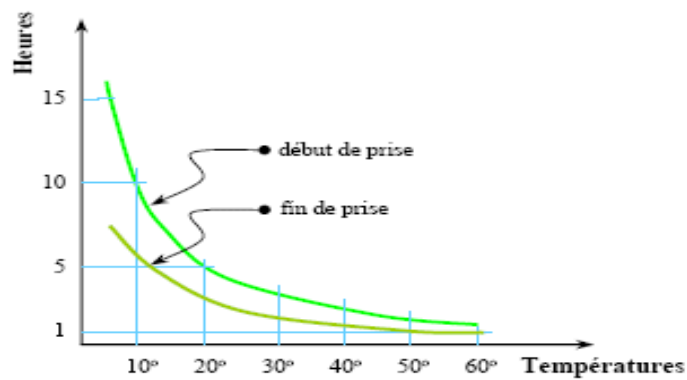


Figure I-7 : Influence de la température sur la prise des ciments.

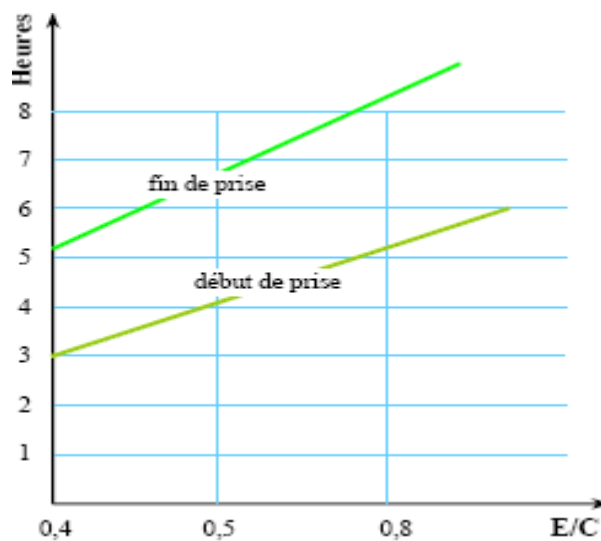


Figure I-8 : Influence du E/C sur le temps de prise

I -7-2 Le durcissement :

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

La prise et durcissement des constituants du clinker :

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

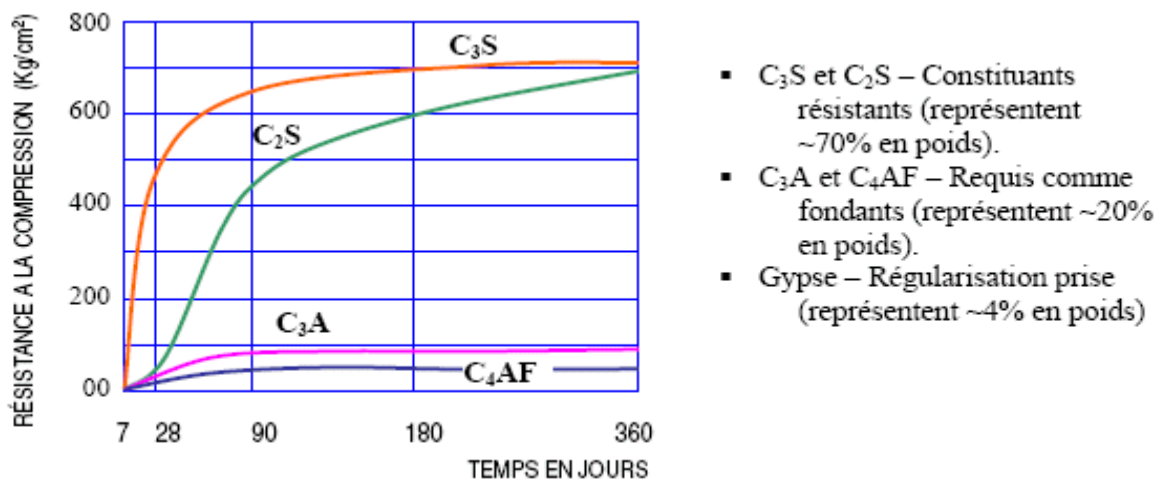


Figure I-9 : Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA.

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C₃A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C₃S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca₂₊ en solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C₃A) sont rapides.

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire (voir figure I.10) Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

Dans le cas des silicates de calcium C_3S et C_2S , la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de $Ca(OH)_2$ en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

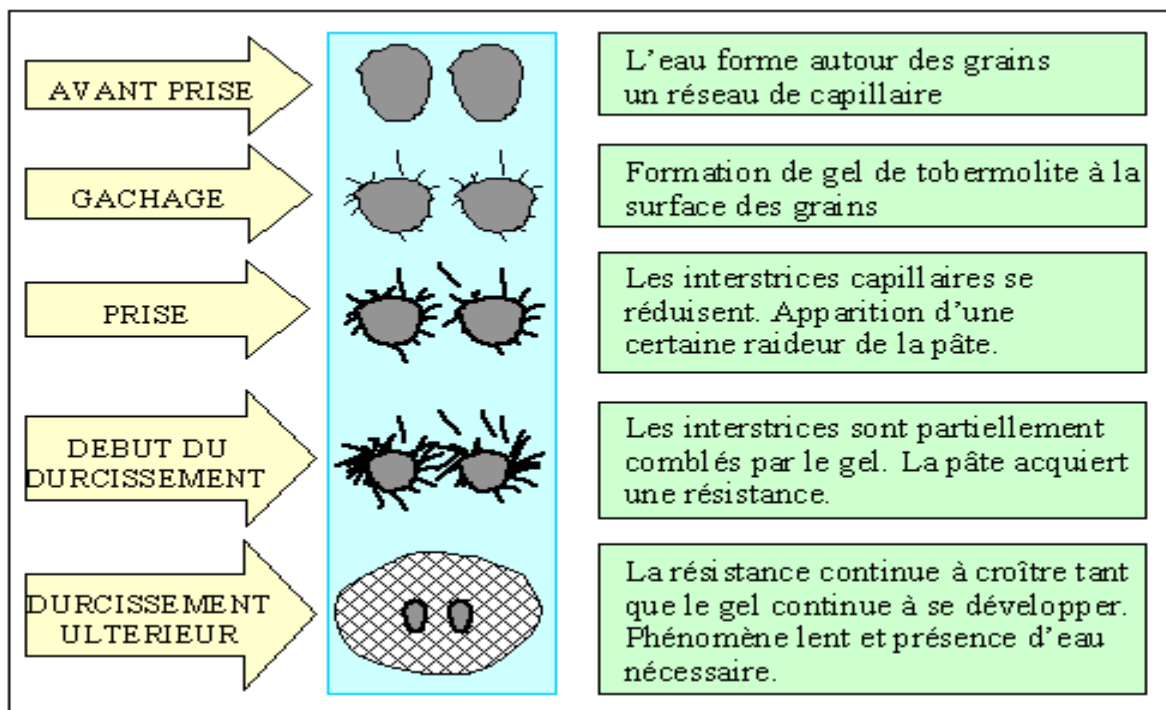
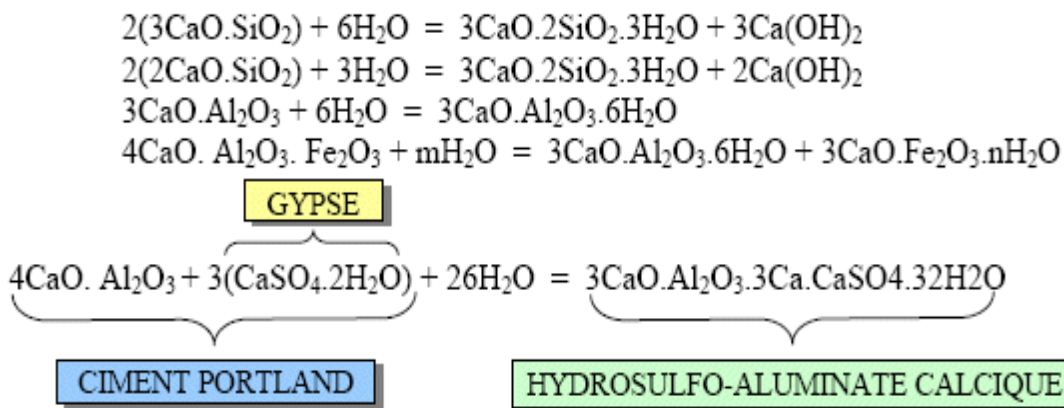


Figure I.10: L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.

Quelques réactions chimiques importantes:



Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands.

I-7-3 La finesse de mouture (finesse de Blaine - NA231 NF EN196-6) :

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g).

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure I-11), par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

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

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur figure (I.12). Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.

Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

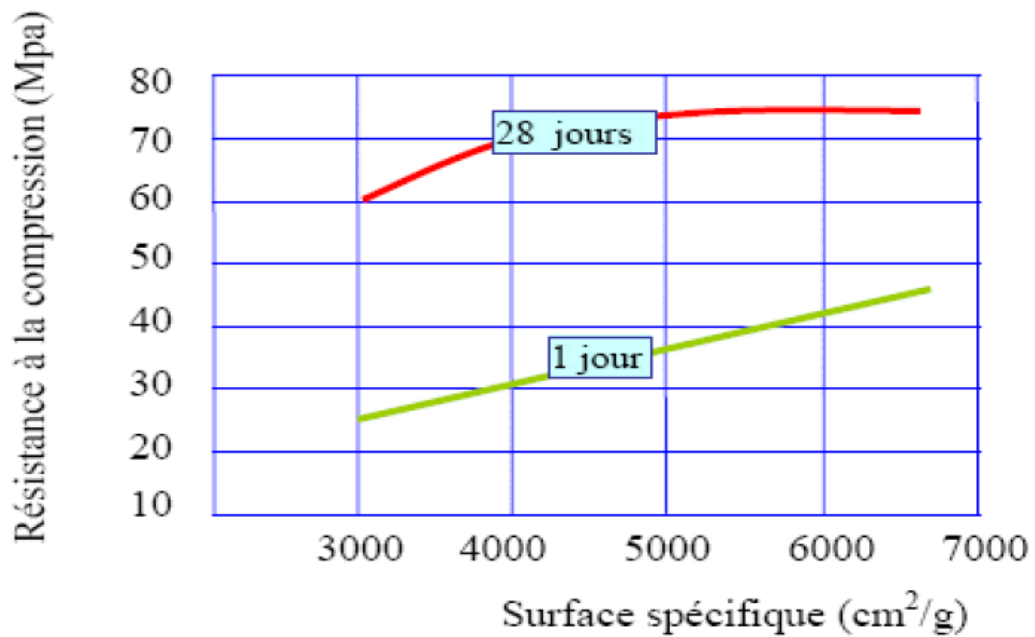


Figure I.11: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

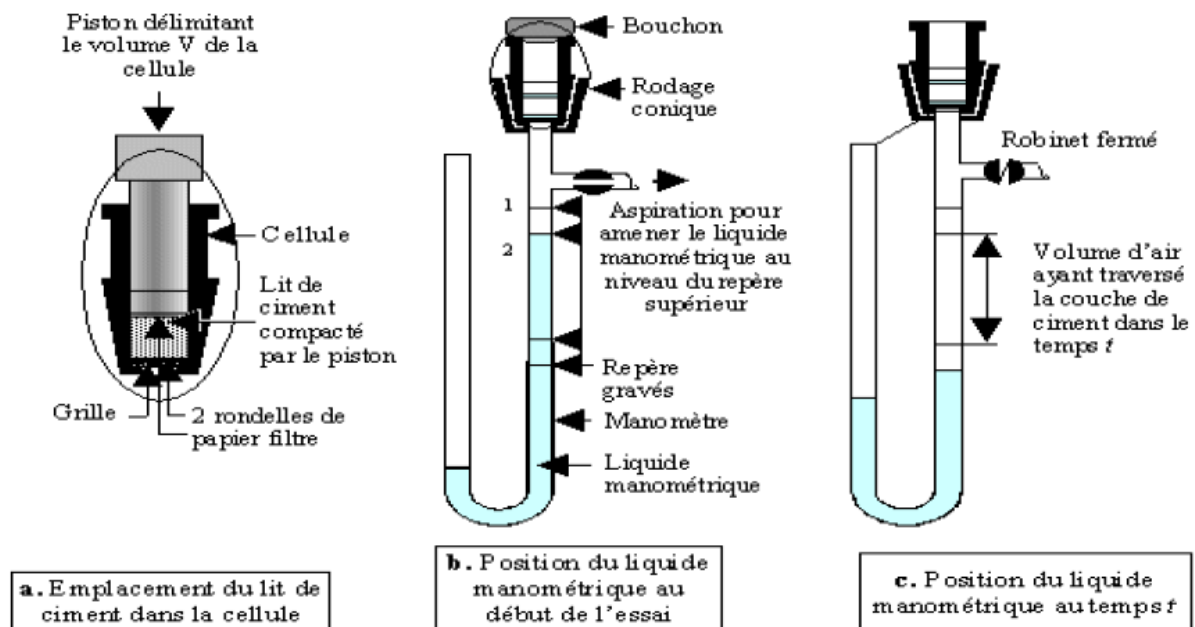


Figure I.12: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.

I-7-4 Le retrait (NA440 NF P15 433) :

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton.

En fait il existe plusieurs types de retrait :

❖ Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique. Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage.

❖ Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe.

❖ Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement. L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:

- la nature du ciment.
- le dosage en eau (figure I-13).
- la propreté des sables.
- la forme et la dimension des granula

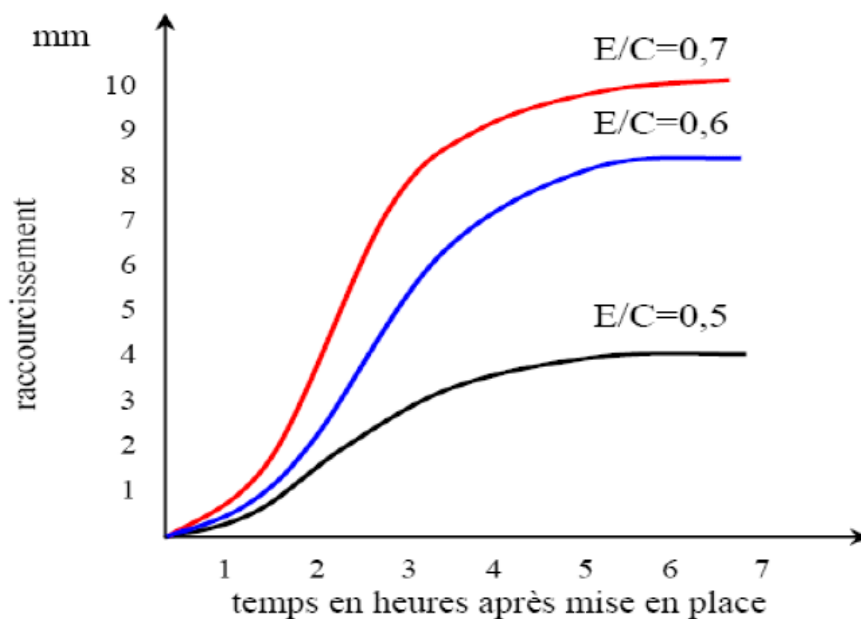


Figure I.13: Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers.

I-7-5 Chaleur d'hydratation (EN196-9 NF P15-436) :

Domaine d'application :

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langvant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

Principe :

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence. L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

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

- **la finesse de mouture:** plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- **la nature des constituants:** les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- **la nature minéralogique du clinker:** plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte la température extérieure (voir tableau I-6).

N	Constituants	Comportement des constituants purs	Chaleur dégagée
1	C_3S	Fait prise et durcit rapidement. Haute résistance atteinte à court terme.	120cal/gr.
2	C_2S	Réagit lentement. Haute résistance atteinte à long terme.	62cal/gr.
3	C_3A	Prise de façon très désordonnée et rapide. Faible résistance (pour régulariser la prise du C_3A ; il faut ajouter du gypse).	207cal/gr.
4	C_4AF	Faible résistance.	100cal/gr.

Tableau I-6 : Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.

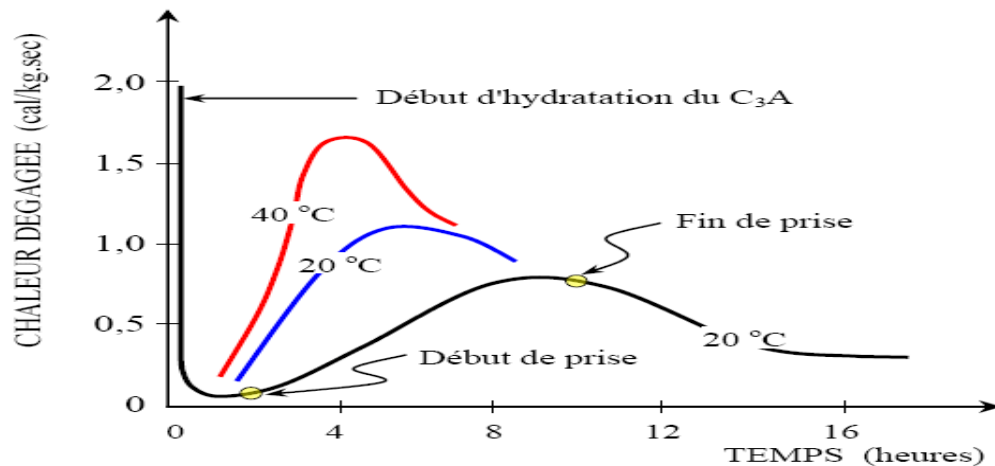


Figure I.14: Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.

I-7-6 Stabilité de volume :

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps.

On simule l'effet du temps en accélérant les processus de durcissement par une cuisson à 100 °C pendant 3 heures d'une pâte durcie de ciment à consistance normale âgée de 24 heures.

Pour mesurer l'expansion. On utilise les aiguilles de Le Châtelier. la différence d'ouverture des aiguilles avant et après cuisson doit rester inférieure à 10 mm.

I-7-7 Résistance à la compression (NA 234 EN 196-1) :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³.

La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en Mpa (voir Figure 1-19).

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1.

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances

Pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

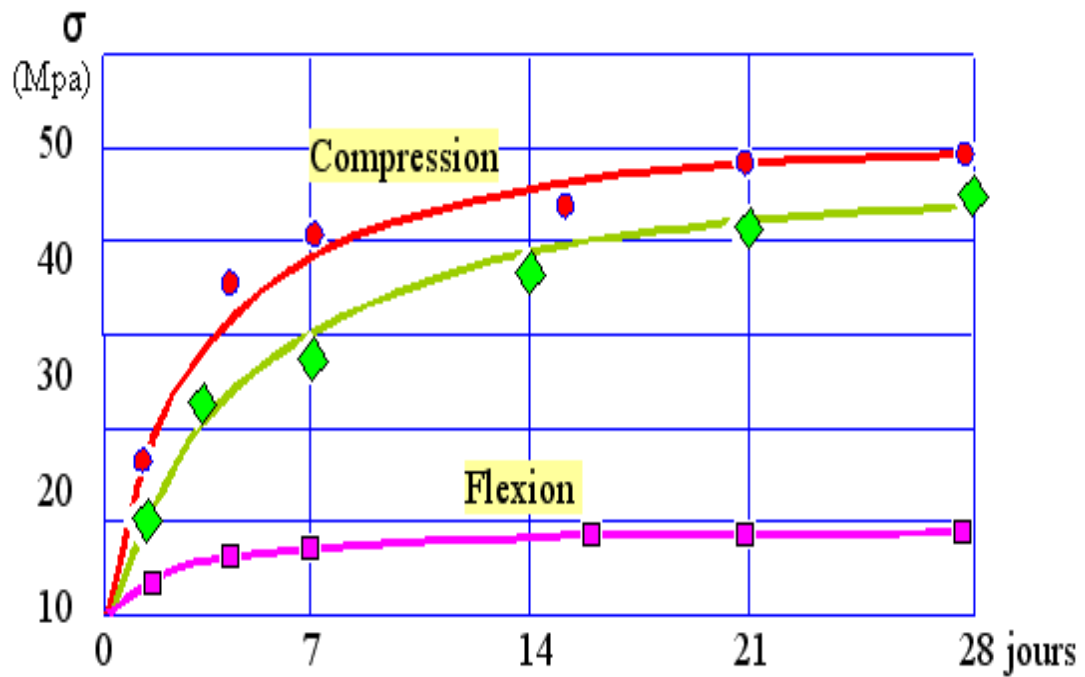


Figure 1-15 : Résistance du mortier normal.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a donné la définition du ciment et son historique et le types des ciments. On a aussi parlé sur l'hydratation du ciment et ses caractéristiques.

CHAPITRE II :
LES AJOUTS MINERAUX

Chapitre II: les ajouts minéraux

Introduction :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou pouzzolanique. Les ajouts minéraux cimentaires typiques sont les calcaires(L), les cendres volantes (C.V), le laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) et les fumées de silice (F.S). [23]

II-1 Définition des ajouts cimentaires :

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs. [24]

II-2 Définition des caractéristiques des additions :

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de février 2002, distingue les additions en Deux types : celles quasiment inertes (de type I) et celles à caractère pouzzolanique ou à Caractère hydraulique latent (de type II).

Comme additions de type I sont considérés en premier lieu les fillers dont les caractéristiques spécifiques sont déterminées par la pré-norme prEN 12620 (2000) ainsi que les pigments pour le béton conformes à la norme EN 12878.

Comme additions de type II sont considérées les fumées de silice conformes à la pré-norme Pr EN 13263 (1998) et les cendres volantes conformes à la norme EN 450.

Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition ((additions pour béton hydraulique)) à savoir :

- Additions de type I selon la norme EN 206-1
 - Les additions calcaires (NF P 18-508)
 - Les additions siliceuses (NF P 18-509)
 - Les fillers (NF P 18-501)
- Additions de type II selon la norme EN 206-1 :
 - La fumée de silice (NF P 18-502)
 - Les cendres volantes de houille (NF P 18-505)
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506). [25]

II-3 Classification des ajouts minéraux dans le ciment Portland :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN197-1 en ajouts minéraux inertes et actifs. [26]

Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau ci-dessous.

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

Tableau II-1: Classification des ajouts selon leur réactivité. [27]

II-3-1 Principaux ajouts minéraux inertes :

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et 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 les Schistes calcinés. Aires dans les industries du ciment.

II-3-1-1 Les calcaires (L) : résultent du broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%. Ce sont principalement des «fillers» c'est-à-dire des calcaires inertes.

Ils sont :

- soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques,
- soit obtenus par broyage du matériau cru.

Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium. Ils peuvent contenir de l'oxyde de magnésium, il s'agit alors de calcaires dolomitiques.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes :

- origine métamorphique, il s'agit de marbres
- origine sédimentaire Le carbonate de calcium existe sous plusieurs formes polymorphiques calcite, aragonite, vaterite. [28]



Figure II-1 : Le calcaire.

a-Propriétés et mode d'action des fillers :

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 état de surface.
- ✓ leur dureté, leur porosité.

Les fillers calcaires sont les plus réactifs en présence de ciment, alors que les fillers siliceux sont pratiquement inertes. La réactivité dépendrait de la nature du calcaire, de son état de cristallisation. C'est ainsi qu'une calcite à réseau cristallin désorganisé donne une augmentation de résistance plus rapide qu'une calcite bien cristallisée. [28]

b-Utilisation des fillers :

Les fillers s'utilisent :

- Pour la fabrication de certain ciment.
- En ajout aux mortiers ou béton, afin de corriger la granulométrie d'augmenter la compacité. Les fillers constituent, par ailleurs, des ajouts par fois utilisés dans certains adjuvant (plastifiants, hydrofuges, des mortiers prêts à l'emploi, des enduits des ciments colles, des peintures, des bétons bitumineux.

c- Rôles des fillers :

Les fillers ajoutés au ciment ou au béton jouent 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 C_3S et du C_3A 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.

II-3-1-2 Schistes calcinés :

Les schistes calcinés, et en particulier les schistes bitumineux calcinés, sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. Du fait de la composition de la matière naturelle ainsi que du procédé de production, les schistes calcinés contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique, de même que de petites quantités de chaux libre (CaO et de sulfate de calcium 9), ainsi que des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, particulièrement SiO_2 .

De ce fait, les schistes calcinés finement broyés montrent de fortes propriétés hydrauliques, comme le ciment Portland, et, en plus, des propriétés pouzzolaniques.

Si la proportion de schistes calcinés dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal) seuls les schistes calcinés satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisés.

II-3-2 Principaux ajouts minéraux actifs :**II-3-2-1 Laitier granulé de haut-fourneau (S):**

Le laitier granulé de haut-fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. C'est donc un coproduit de la fabrication de la fonte. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment. Il est composé principalement d'oxydes de calcium, de silice et d'alumine. [25]

II-3-2-2 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 possédant des propriétés liantes. [30]

Les Normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :



FigureII-2: La pouzzolane.

- 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.

- 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.

-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 [31] et [32].

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. [30]

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 :

a- 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.

b- 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.

II-3-2-3 Les fumées de silice (D) :

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ $1\mu\text{m}$) qui présentent une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. Elles sont très réactives (réaction pouzzolanique très rapide) et elles accélèrent également les réactions d'hydratation des phases du clinker, et aussi elles diminuent la perméabilité du ciment et augmentent d'une manière générale les propriétés de résistances mécaniques des pâtes. Ce sont des particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment. [33]



Figure II-3: Fumée de silice.

En effet, l'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui plastifie le béton ayant un rapport E/L de 0,15 à 0,20. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de 0,1 mm de diamètre à partir de l'âge de 7 jours, ce qui rend le béton au fumée de silice tout à fait imperméable. L'action pouzzolanique permet en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation de produire un CSH très dense qui permet des gains de résistances en compression dès l'âge de 7 jours. [34]

II-3-2-4 Cendres volantes :

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO). Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%. [32]



Figure II-4 : Cendre volante.

II-4 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux lors de la fabrication des ciments**Portland :**

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

II-4-1 Intérêt du point de vue technique :

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration. [2]

II-4-2 Intérêt du point de vue économique :

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, Puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland. [2]

II-5-3 Intérêt du point de vue environnemental :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker Permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂. [23]

II-5 Utilisation des additions minérales en Algérie :

Bien que l'emploi des additions minérales se soit généralisé dans le monde, il reste très limité en Algérie. Vu la disponibilité en grande quantité de ces ajouts tels que le laitier granulé, le calcaire ou la pouzzolane naturelle et leurs coûts relativement réduit par rapport au ciment, leurs emploi dans le domaine du génie civil n'est pas encore répandu. En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons. Actuellement, l'emploi des additions se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire pour la production du ciment composé.

Le tableau II-2 résume l'utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes.

Cimenterie	Ajouts utilisés
Ain Touta (Batna) Ain El Kebira (Sétif) Hamma Bouziane (Constantine)	Pouzzolane
Hadjar Soud (Skikda) Tebessa	Laitier granulé
Meftah (Alger) Raïs Hamidou (Alger) Sour EL Ghozlane (Bouira)	Tuf/Calcaire - Calcaire/Tuf
Chlef	Calcaire
M'sila	Laitier granulé Pouzzolane
Beni Saf (Tlemcen) Zahana (Oran) Saida	Pouzzolane

Tableau II-2 : Utilisation des additions minérales dans les cimenteries algériennes.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a donné la définition des ajouts minéraux et les types d'ajouts. On a aussi parlé de l'utilisation des additions minérales en Algérie.

CHAPITRE III :
LE MORTIER

Chapitre III : Les mortiers

Introduction:

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.), au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de : de solidariser les éléments entre eux, d'assurer la stabilité de l'ouvrage, de combler les interstices entre les blocs de construction. [35]

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables, leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. [36]

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être :

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs préposés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers. [37]

III-1 Composition du mortier :

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du sable ; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en oeuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- ❖ liant (ciment ou chaux)
- ❖ eau
- ❖ sable
- ❖ adjuvants

Le liant:

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson. [38]

Généralement, on peut utiliser:

- Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt,...).
- Les liants à maçonner.
- Les chaux hydrauliques naturelles.
- Les chaux éteintes.

Le sable:

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements: il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut. [39]

L'eau de gâchage:

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en oeuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

Les adjuvants:

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les superplastifiants (haut réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) et les hydrofuges. [40]

Action	Rôle	Domaine d'emploi
La prise	Il diminue le temps ou prise ou durcissement du ciment.	Bétonnage pour temps froid, décoffrage rapide, travaux sous l'eau.
	Il augmente le temps de prise.	Bétonnage par temps chaud, avec coffrage glissant.
L'ouvrabilité	A teneur en eau égale, il augmente l'ouvrabilité du béton et mortier	Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant.
	A même maniabilité, il augmente les résistances.	Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant.
	Il provoque un fort accroissement de maniabilité.	Fondation, dalles, raideurs, béton pompé.
Les résistances aux agents extérieurs	Il entraîne la formation de microbulles d'air uniformément.	Béton exposé au gel, bétons routiers
	Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers.	Ouvrage hydraulique, mortiers d'étanchéité.

Tableau III-1: Différentes actions des adjuvants. [40]

III-2 Les différents types de mortiers :**III-2-1 Les mortiers de ciment :**

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 1/2. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables. En revanche, il est davantage sujet au retrait. [36]

III-2-2 Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment. Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment. [37]

III-2-3 Les mortiers bâtards :

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide. [36]

III-2-4 Les mortiers fabriqués sur chantier :

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables. [36]

III-2-5 Le mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants. [41]

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

- mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- mortiers d'imperméabilisation,
- mortier d'isolation thermique,
- mortier de jointoiment,
- mortier de ragréage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes,
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

III-3 Classification des mortiers :

La classification des mortiers est comme suite: [42]

III-3-1 Classification générale des mortiers :**• Selon leur domaine d'utilisation**

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes:

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Support pour les peintures murales.
- Mortier d'injection.
- Mortier de réparation pour pierres.

· Selon la nature du liant

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

- Mortier de ciment portland.
- Mortier de chaux.
- Mortiers bâtards.
- Mortier à base de ciment de maçonnerie.

III-4 Caractéristiques principales :

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- ouvrabilité ;
- prise ;
- résistances mécaniques ;

- retrait et gonflements, etc. [40]

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a donné la définition du mortier et les types de mortiers. On a aussi parlé des caractéristiques des mortiers.

CHAPITRE IV :
CARACTERISTIQUES DES
MATERIAUX UTILISES

Chapitre IV : Caractéristiques des matériaux utilisés

Introduction :

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques des matières premières, la méthode de formulation des ciments et mortier est défini, l'importance des essais appliqués sur le ciment, et le mortier dans toutes les étapes, des essais physiques, chimiques, et mécaniques ont été effectués au laboratoire de la cimenterie de Lafarge à Hammam Dalaa-M'sila.

IV-1 Matières premières:

Les Principaux composants des ciments élaborés sont :

- Clinker.
- Gypse.
- Calcaire.

IV-1-1 Le clinker :

La composition en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker et donc son hydraulité, c'est-à-dire sa capacité de réagir avec l'eau pour former des composés hydratés. Cela explique le soin qu'on doit apporter pour que la matière introduite dans le four ait une composition chimique constante vis à vis des quatre oxydes fondamentaux CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 .

Les matériaux (matières premières) utilisés pour la fabrication du clinker dans la cimenterie de Hammam Dalâa sont présentés dans le tableau :

Clinkers des Ciments composés étudiés	Clinker de Hammam Dalaa
Matériaux	Calcaire
	Argile
	Minerai de fer
	Sable

Tableau IV-1: Constituants principaux du cru de clinker.

IV-1-1-1 Composition chimique du clinker :

Les compositions chimiques du clinker utilisé sont indiquées dans le tableau .Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de lafarge hamma dalaa.

Eléments (Oxydes)	Clinker (%)
SiO ₂	20,98
Al ₂ O ₃	4,92
Fe ₂ O ₃	3,33
CaO	66,18
MgO	1,80
SO ₃	1,10
K ₂ O	0,64
Na ₂ O	0,10
Cl-	0,02

Tableau IV-2: Composition chimique du clinker.

IV-1-1-2 Composition minéralogique du clinker :

On a déterminé la composition potentielle du clinker selon le calcul de Bogue qui est largement utilisé dans l'industrie cimentière dans la mesure où il permet d'estimer à partir de son analyse chimique élémentaire des majeurs (calcium, silice, alumine et fer), la composition minéralogique du clinker. Se trouve à l'application du calcul de Bogue.

La composition minéralogique de clinker des ciments étudiés est présentée dans le tableau (IV-3)

Les équations ou formules de Bogue

- ❖ C₃S= 4.07 CaO-7.60 SiO₂-6.72 Al₂O₃-1.43 Fe₂O₃.
- ❖ C₂S= -3.07 CaO+8.60 SiO₂+5.07 Al₂O₃+1.08 Fe₂O₃.
- ❖ C₃A= 2.65Al₂O₃-1.69 Fe₂O₃.
- ❖ C₄AF= 3.04 Fe₂O₃.

minéralogiques du clinker	Constituants Teneur en % rapportée au clinker
C ₃ S	65,47
C ₂ S	1 0,78
C ₃ A	7,41
C ₄ AF	10,12

Tableau IV -3: Composition minéralogique des clinkers.

IV-1-2 Le gypse :

IV-1-2-1 Composition chimique :

Le gypse ont utilisé dans cette étude gypse de Biskra. Le gypse doit être ajouté en faible quantité (moins de 5%) aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de réguler la prise et ne pas Masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.

Eléments (Oxydes)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-
GYPSE BISKRA	9,13	1,95	1,10	28,68	9,57	30,02	0,07	0,00	0,024

Tableau IV-4 : Composition chimique du gypse.

IV-1-2-2 Composition minéralogique du gypse :

Eléments	%
R_wp	10,60
Gypsum	60,07
Hemi-Hydrate	0,00
Anhydrite	0,05
Calcite	3,21
Dolomite	29,04
Quartz	1,10
Illite	4,70
Chlorite	1,84
SO₃_XRD	27,96

Tableau IV-5 : Composition minéralogique du gypse.

IV-1-3 Fillers calcaires :

Les fillers calcaires utilisé dans notre étude provient de la carrière de djable chouf ammar située dans hammam dalaa, où sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimiques effectuées dans laboratoire de chimie la cimentrie de lafarge hammam dalaa. L'analyse chimique de fillers calcaires utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau suivant :

IV-1-3-1 Composition chimique du calcaire :

Eléments (Oxydes)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL-	H ₂ O
Calcaire (%)	6,90	2,41	1,48	47,64	1,06	0,17	0,22	0,01	0,02	1,61

Tableau IV-6 : Composition chimique du calcaire.

IV-1-3-2 Composition minéralogique du calcaire :

Eléments	(%)
R_wp	5,79
Calcite	88,82
Dolomite	2,26
Quartz	3,11
Pyrite	0,17
Illite	2,81
Chlorite	0,65
Kaolinite	2,61
Albite	0,01
CO ₂ _XRD	40,13

Tableau IV -7 : Composition minéralogique du calcaire.

IV-2 Formulation des ciments:

IV-2-1 Procède de préparation des différents ciments :

Les matières premières (clinker, gypse et calcaire) après avoir traversé plusieurs étapes (concassage, séchage et broyage) dans un broyeur à boulet BB10 avec une capacité de 10 kg d'une certaine période de temps au laboratoire de la cimenterie de Lafarge « Hammam Dalaa ». Mélangés l'échantillon chaque fois ; on mesure la finesse pour chaque type de ciments préparés.

La finesse (surface spécifique) des différents ciments (CEM II/B et CEM II/A) ont été déterminée par la méthode de Blaine (Perméabilimètre de Blaine) en faisant varier le temps de broyage. Cette finesse est une caractéristique importante, lors du gâchage, plus la surface du ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

IV-2-2 Composition pondérale des ciments préparés :

Types de ciments	Clinker (%)	Gypse (%)	Calcaire (%)
CEM II/B 42,5	73	5	22
CEM II/A 52,5	82	5	13

Tableau IV-8 : Compositions pondérales des ciments préparés.

IV-2-3 Analyses chimiques des ciments préparés :

• Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
CEM II/B 42,5 (%)	18.20	4.78	3.00	59.07	1.94	2.55	0.6	0.11	9.05
CEM II/A 52,5 (%)	19.55	4.68	3.28	61.03	1.97	2.60	0.6	0.11	5.01

Tableau IV-9 : Composition chimique des ciments préparés.

IV-3 Formulation des mortiers normalisés :

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

- 1350 g sable normalisé (Norme EN 196-1).
- 450 g du ciment.
- 225 g l'eau de gâchage.

IV-3-1 Sable normalisé «EN 196-1» :

Les mortiers sont élaborés avec du sable normalisé **CEN EN 196-1**.

Le sable normalisé CEN doit être conforme à la composition granulométrique spécifiée. Elle est déterminée par une analyse granulométrique réalisée sur un échantillon représentatif de sable, d'une masse totale au moins égale à 1350g. Le tamisage doit être poursuivi jusqu'à ce que la quantité de sable passant à travers chaque tamis soit inférieure à 0,5g/min. La teneur en eau doit être inférieure à 0,2 %. Elle est déterminée par la perte de masse d'un échantillon représentatif de sable après séchage à masse constante à une température comprise entre 105 et 110°C, et exprimée en pourcentage en masse de l'échantillon sec. Ces exigences ne suffisent pas pour garantir que le sable normalisé CEN a des performances équivalentes à celles du sable de référence CEN. Cette équivalence doit être initialement établie et confirmée par les essais de validation. Le sable normalisé CEN doit être conditionné dans des sacs d'une contenance de (1350±5) g.



Figure IV-1: Sable normalisé.

Sable Normalisé EN 196-1 (Conforme ISO 679)

tamis en (mm)	refus cumules en (g)	refus cumules en %	Tamisats en %
2	0	0	100
1,6	110,2	8,16	91,84
1	465,3	34,47	65,53
0,5	911,1	67,49	32,51
0,16	1162,3	86,10	13,90
0,08	1348,5	99,89	0,11

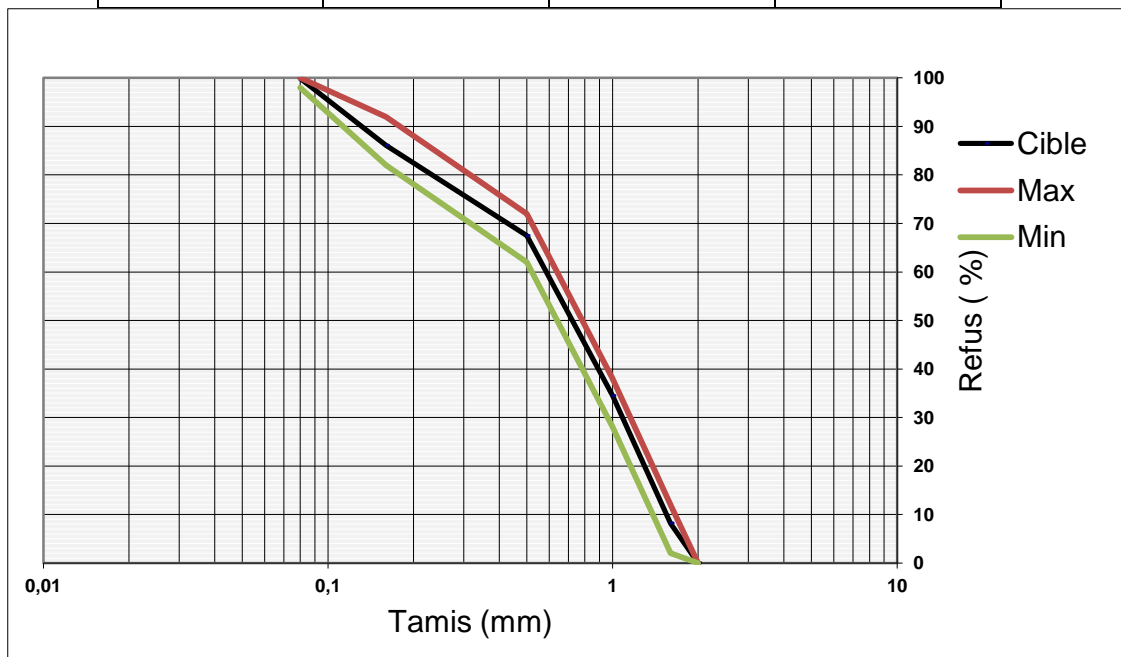


Tableau IV-10 : Analyse granulométrique de sable normalisé.

IV-3-2 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillée préparé au laboratoire de la cimenterie (Lafarge M'sila).



Figure IV-2 : Distillateur (Lafarge laboratoire).

IV-4 Méthodes d'essais :

Pour analyser les caractéristiques physico mécaniques de la pâte, mortier nous avons appliqué les différents essais.

- **Condition de laboratoire**

Le laboratoire dans lequel a lieu la préparation des éprouvettes doit être maintenu à une température de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.

La chambre ou la grande armoire humide pour la conservation des éprouvettes, dans leur moule, doit être maintenue à une température de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 90 %. Les bacs pour la conservation des éprouvettes dans l'eau et les grilles qui les équipent doivent être constitués d'un matériau qui ne réagit pas avec le ciment. La température de l'eau doit être maintenue à $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$.

La température et l'humidité relative de l'air dans le laboratoire, ainsi que la température de l'eau dans les bacs de conservation, doivent être enregistrées au moins une fois par jour pendant les heures de travail. La température et l'humidité relative dans la chambre ou l'armoire humide doivent être enregistrées au moins toutes les 4 h.

Le ciment, le sable normalisé CEN, l'eau et l'appareillage utilisés pour confectionner et Essayer les éprouvettes doit être à une température de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Lorsque des plages de températures sont données, la température de réglage de l'équipement doit être la valeur médiane de la plage indiquée.



Figure IV-3 : Condition de laboratoire (Lafarge laboratoire).

IV-4-1 Essai sur ciment anhydre :

IV-4-1-1 La Masse volumique absolue:

- Objectif de l'essai

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue (ou poids spécifique) de ciments utilisés dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier".

- Conduite de l'essai :

- Peser 64 g de ciment
- Introduire le benzène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit v_0
- Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ($20 \pm 2^\circ\text{C}$)
- Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- Introduire la poudre de ciment dans le densimètre
- Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre
- Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.

- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit v_1
- Calcul de la masse volumique absolue par la relation :

$$\gamma_c = M / (V_1 - V_0)$$



Figure IV-4: Flasque le chatelier.

IV-4-1-2 Mesure de la finesse du ciment :

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g .

Objectif de l'essai

Déterminer la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. Elle est exprimée en cm^2/g , conformément à la norme EN-196-6

- **Principe de l'essai**

Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface massique est proportionnelle à $t^{1/2}$. La masse volumique du ciment étant connue.

- **Equipement nécessaire utilisé**

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

- **Conduite de l'essai :**

- Peser une quantité de ciment pour obtenir un lit de ciment de porosité $e = 0.500$.
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston.
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre.
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1\eta}} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right)$$

Avec :

K: Constante d'étalonnage de l'appareil ($K = 2.106$).

ρ : Masse volumique du ciment en g/cm^3

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde.

m : est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine.

$$m = \rho c.v.e$$

$V = 1.848$ volume de la cellule.

$e =$ porosité du ciment dans la cellule.

CEM II/B 42,5 CEM II/A 52,5	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 4	CEM 5	CEM 6	CEM 7	CEM 8	CEM 9	CEM 10
SSB (cm ² /g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600

Tableau IV-11 : SSB des différents ciments préparés.

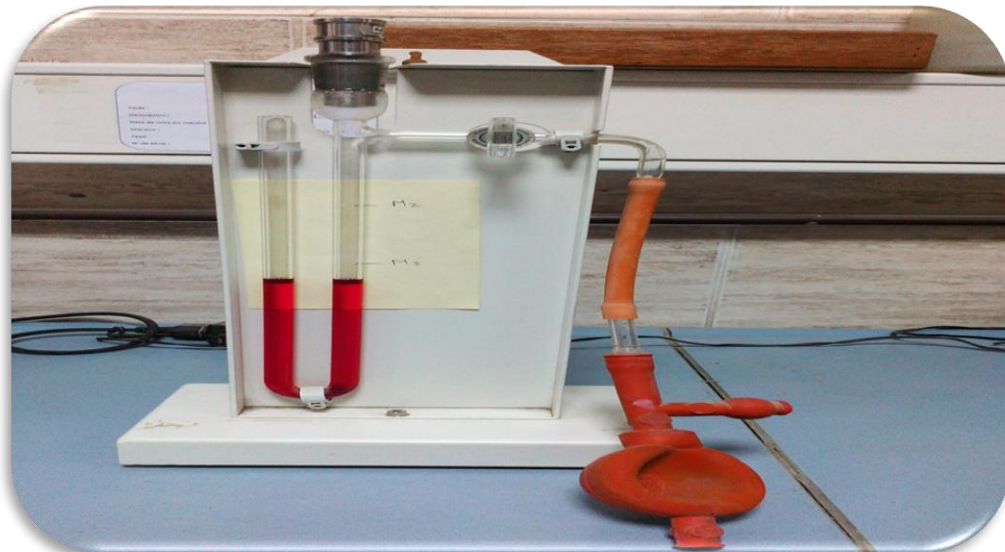


Figure IV-5 : Le densimètre manuel.

IV-4-1-3 Analyse granulométrique (Méthode alpine) :

- **Objectif de l'essai**

Ce mode opératoire a pour but de décrire le mode d'emploi d'utilisation de la tamiseuse ALPINE référencé M0212.

Nous allons décrire l'appareil et les étapes pour procéder à un tamisage de produits et nous préciserons les consignes à respecter.

- **Domaine d'application**

Le tamis à air ALPINE est un appareil utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière.

- **Mode opératoire**

- ✓ Appareillage



Figure IV-6 : Tamiseuse à courant d'air.

- **Description**

Le tamis à air ALPINE fonctionne sans aucun mouvement mécanique du tamis ou des autres parties en contact avec la matière, mais simplement par courant d'air.

Il consiste dans l'utilisation contrôlée du courant d'air, pour disperser la matière, entraîner le fin (les fines) à travers les mailles du tamis, nettoyer le tamis.

L'ensemble de l'appareil comprend :

- le tamis Alpine avec manomètre en U.
- le ventilateur.
- le dépoussiéreur (filtre).
- le tambour tamisant.
- un filtre pour recueillir les fines (éventuellement)
- deux tamis : 45 μ m, 90 μ m.

Détermination du rejet en utilisant un seul tamis :

Voici les étapes à suivre :

- faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- mettre en place le couvercle en plexiglas.
- brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min avec le bouton molleté.
- mettre en route l'aspiration.

Chapitre IV Caractéristiques des matériaux utilisés

La minuterie étant branchée, la lance fendue commence à tourner, le ventilateur et l'aspiration de poussière démarrent, le tamisage commence. A travers le plexiglas, on peut observer directement le tamisage.

Si au début de l'opération, une partie de la matière se colle au couvercle, il faut la décoller, aussi longtemps que nécessaire, en donnant toutes les 10 secondes environ quelques coups sur le bouton du couvercle avec le marteau en matière plastique.

Par la suite, la matière grossière soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle.

L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels.

Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière.

- Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement.

Couper alors l'aspiration.

- Peser la matière restant sur le tamis.

Soit **P** le poids trouvé en grammes.

$$\text{Rejet} = P \times 10 (\%)$$

Taille (μm)	Rejet (%)									
	CEM II/B 01	CEM II/B 02	CEM II/B 03	CEM II/B 04	CEM II/B 05	CEM II/B 06	CEM II/B 07	CEM II/B 08	CEM II/B 09	CEM II/B 10
	45	13,9	12,2	11,5	10,7	9,5	9,2	8,9	8,0	7,4
90	1,3	1,2	1,1	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6
SSB (cm^2/g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600

Taille (μm)	Rejet (%)									
	CEM II/A 01	CEM II/A 02	CEM II/A 03	CEM II/A 04	CEM II/A 05	CEM II/A 06	CEM II/A 07	CEM II/A 08	CEM II/A 09	CEM II/A 10
	45	10,5	8,2	7,7	6,7	5,5	4,5	4,3	4,0	3,8
90	1,2	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4
SSB (cm^2/g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600

Tableau IV-12 : Caractéristiques de la granulométrie (Refus 45- 90 μm) des ciments préparés.

IV-4-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment) :

IV-4-2-1 Essai de consistance :

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

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

- **Objectif de l'essai**

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

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

- **Principe de l'essai**

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

- **Equipement nécessaire utilisé**

- Une salle maintenue de manière continue à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50% ;
- Un malaxeur décrit dans la norme EN 196-1 ;
- Un appareil de Vicat muni
- d'une sonde d'un diamètre $\phi = 10 \text{ mm}$
- d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et de diamètres 70 et 80 mm ;
- d'une tige coulissante équipée sur laquelle vient se placer la sonde (la masse totale « tige + sonde » est de 300 g).
- une plaque en verre qui sert comme base pour le moule ;
- une graduation (réglable en hauteur) permet de mesurer la distance qui sépare le dessous de la sonde de la plaque de base.
- Une balance précise à 1 g près.

• Conduite de l'essai

- Peser 500 g de ciment 125 g d'eau
- Verser l'eau dans le récipient du malaxeur puis ajouter le ciment en un temps compris entre 5 et 10. La fin du versement du ciment donne le temps 0;
- Ajouter 500 g de ciment à l'eau, en un temps compris entre 5 et 10 s. La fin du versement du ciment donne le temps 0 ;
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s ;
- Arrêter le mouvement, démonter le batteur et récipient, racler les parois du récipient puis remonter le tout en une durée d'environ 15 s ;
- Remettre le malaxeur en marche pour une durée de 90 s à vitesse lente ;
- Remplir le moule tronconique de la pâte fabriquée et araser la face supérieure ;
- Placer le moule et son support sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser la sonde au contact de la pâte ;
- Régler l'index des graduations au point 0
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale. La sonde s'enfoncera plus ou moins profondément dans la pâte alors dans la pâte.
- Noter l'indication de l'index sur la graduation après immobilisation de la partie mobile
- Si l'épaisseur mesurer est supérieure à 7 mm ; il n'y a pas assez d'eau
- Si l'épaisseur mesurer est inférieure à 5 mm ; il y a trop d'eau
- La pâte sera de consistance normalisée si l'épaisseur $d = 6 \text{ mm} \pm 1$,

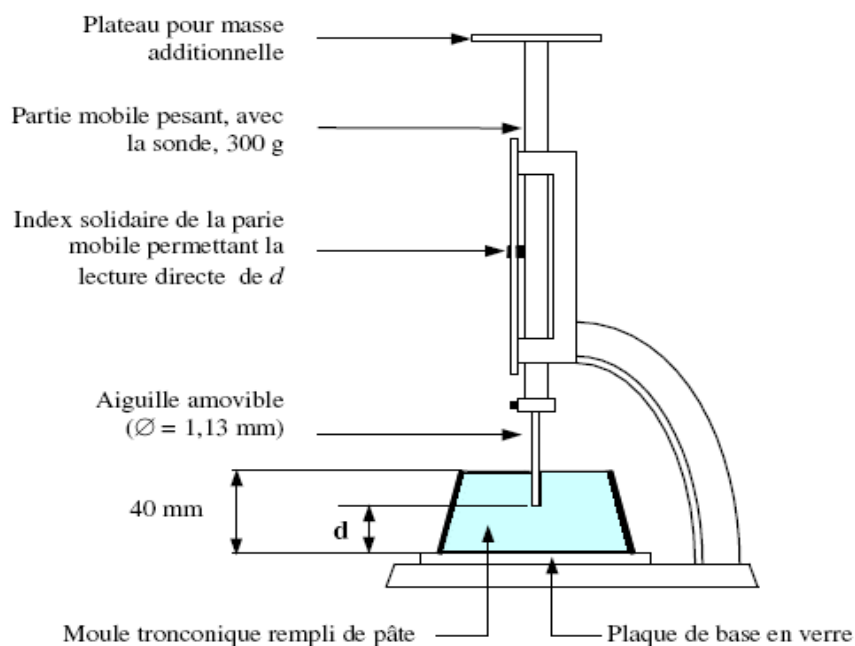


Figure IV-7 : Appareil de vicat manuel.

IV-4-2-2 Essais de prise :

- **Objectif de l'essai**

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

- **Principe de l'essai**

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement. l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérée l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que **$d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$** .

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

- **Equipement nécessaire utilisé**

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

- confectionner une pâte normalisée comme indiqué au 4.4.2.1. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;
- Remplir le moule tronconique, et araser la face supérieure ;
- Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;
- Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale
- Relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- si l'arrêt se produit à une distance $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$; La prise est commencée ;
- si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$
- On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base ;



Prismètre (vicat automatique).



Manuel vicat.

Figure IV -8 : L'appareil de Vicat.

IV-4-2-3 Essai de stabilité :

- **Objectif de l'essai**

L'essai consiste à mesurer l'augmentation de volume provoquée lors de la réaction d'hydratation par la présence de l'oxyde de calcium ou de magnésium contenu dans les ciments étudiés.

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à faire accélérer la réaction d'hydratation par un traitement thermique de la pâte pour pouvoir observer une expansion éventuelle des cinq types de ciment testé.

- **Equipement nécessaire**

-Une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et au moins 90% d'humidité relative.

-Une bouilloire dans laquelle les éprouvettes sont immergées et la température de l'eau est portée de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ébullition en $3\text{h} \pm 5\text{mn}$ Deux moules en laiton élastique appelés "appareil le Chatelier".

-Ces moules sont fondus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation de volume de la pâte.



Figure IV-9 : Les aiguillé de chatelier dans armoire.

- **Conduite de l'essai**

La pâte de consistance normalisée (voir paragraphe 2-4-2-1) est introduite dans les deux moules en laiton. Conservation des moules pendant 24h dans l'armoire humide.

Au bout de ce temps on mesure à 0.5mm près l'écartement **A** des pointes des aiguilles, Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant $3h \pm 5mn$ à une température d'ébullition. Soit **B** l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit **C** l'écartement après refroidissement à 20°C La stabilité est caractérisée par la valeur C-A

Stabilité = C-A

Expansion = B-A

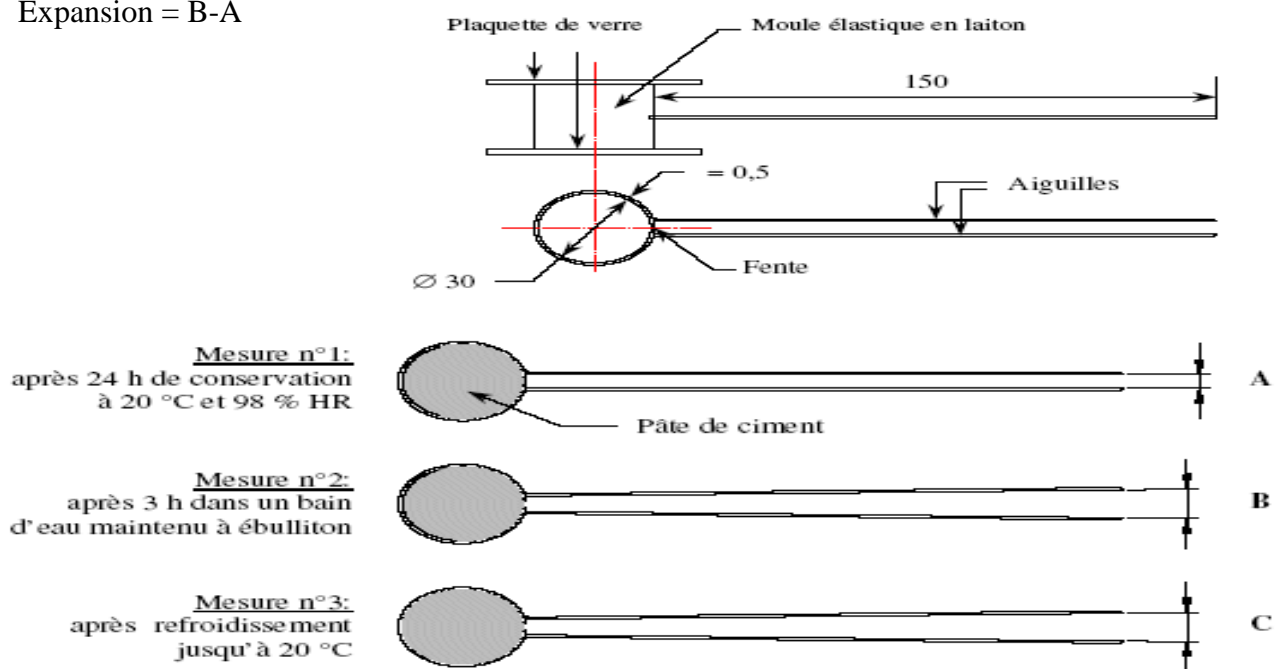


Figure IV-10 : Les aiguilles le chatelier.

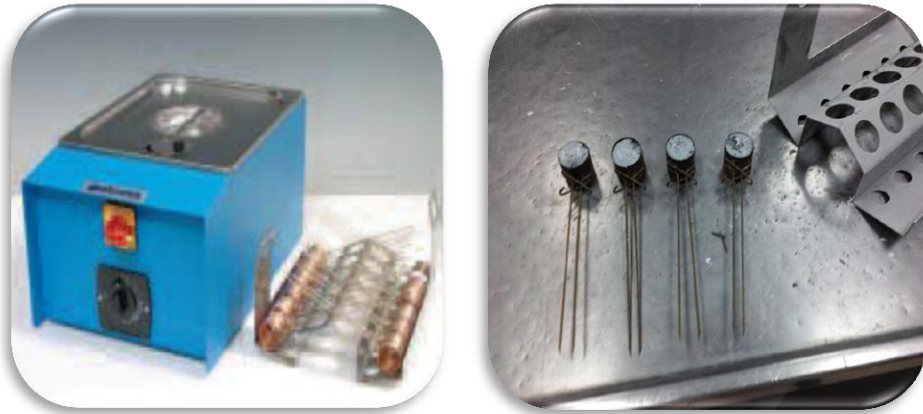


Figure IV-11 : Le bouilloire de chatelier.

IV-4-3 Essais sur mortiers :

IV-4-3-1 Mortier normalisé :

Dans le but de confirmer l'évolution des résistances mécaniques, des éprouvettes contenant un mélange ciment portland et calcaire ont été coulés selon la norme EN 196-3 et EN 196-1.

Ciments étudiés = 450 g ;

Sable normalisé = 1350 g ;

Eau de gâchage = 225 g.

IV-4-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques :

Les essais mécaniques ont été préparés des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³ selon la norme EN 196-1 dans un malaxeur semi-automatique. (voir la Figure IV-12 et figure IV-13).



FigureIV-12 : Malaxeur semi-automatique
de mortier
(Laboratoire de lafarge M'sila)



FigureIV-13 : Eprouvette prismatique
(4x4x16) cm³
(Laboratoire de lafarge M'sila)

La Méthodes d'essai des ciments et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc.

Les éprouvettes sont au nombre de trois par moule.



Figure IV-14 : Table à choc (Laboratoire de lafarge M'sila).

- Etiqueter les moules pour identification.
- Placer sans tarder, les moules dans une armoire humide, pendant 24 h.



Figure IV-15: Armoire humide.

Après 24 heures de cure, faire sortir les moules et procéder au démoulage des éprouvettes.



Figure IV-16 : Démoulage des éprouvettes.

- Immerger sans tarder, les éprouvettes dans un bain d'eau de température $20 \pm 1^\circ\text{C}$.



Figure IV-17: Conservation des éprouvettes dans l'eau.



Figure IV-18 : Machine de compression.

IV-4-3-3 Mesure du retrait sur éprouvette de mortier normal :

- **Objectif de l'essai**

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservé à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Trois prismes (4x4x16 cm³) sont préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement.

- **Principe de l'essai**

Après le démoulage de l'éprouvette de dimension (4x4x16) cm³, on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

- **Équipement nécessaire utilisé**

Il est décrit dans la Norme NF P15-433.

Une salle maintenue à une température de 20±2°C Un malaxeur normalisé.

Des moules équipés de plots de retrait en laiton.

Les plots sont vissés au centre de chaque face carré du moule au moment de la mise en place du mortier, puis désolidarisés du moule avant le démoulage.

Un dilatomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 5 µm.

Une tige de 160mm de longueur en invar (insensible aux variations de température pendant la manipulation) pour permettre de régler le zéro du dilatomètre.



Figure IV-19 : Comparateur de retrait (Laboratoire de lafarge M'sila).

- **Conduite de l'essai**

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160mm de longueur, soit L_0 la mesure de l'éprouvette.

Soit $d_l(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t (3, 7 et 28 jours), la longueur de l'éprouvette est:

$$L(t) = L_0 + d_l(t)$$

La variation de longueur au temps t (3, 7 et 28 jours) est :

$$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = d_l(t) - d_l(t_0)$$

La variation relative de la longueur est :

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [d_l(t) - d_l(t_0)]/L_0$$

$\Delta l(t)$ est la moyenne des trois éprouvettes issus de la même confection du mortier.

Si les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est négatif et on parle de retrait.

Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau, $\Delta l(t)$ est positif et on parle de gonflement.

IV-4-3-4 La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique) :

- **Principe d'essai**

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence.

L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

Appareillage :

1-Calorimètre

- a) un vase isotherme
- b) une enveloppe très rigide
- c) Un bouchon isolant : la partie inférieure, la partie centrale, la partie supérieure
- d) caractéristiques de performance

2-Calorimètre de référence

3-Thermomètres à résistance de platine

4- Boîte à mortier

5-Appareil d'enregistrement de la température

6- Malaxeur à mortier : Conforme à l'EN 196-1.



Figure IV-20 : Calorimètre langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila).

Mode opératoire :

a- Composition du mortier :

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de $(1\,575 \pm 1)$ g.

Chaque gâchée de mortier doit être constituée de $(360,0 \pm 0,5)$ g de ciment ; $(1\,080 \pm 1)$ g de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et $(180,0 \pm 0,5)$ g d'eau distillée. Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à $1\,575$ g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues.

b- Malaxage :

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments en contact avec le mortier dans la salle d'essais.

Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ; homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ; verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ; régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s.

Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court.

C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans l'EN 196-1 a été raccourci.

c- Mise en place de l'échantillon d'essai :

Aussitôt après le malaxage, peser $(1\,575 \pm 1)$ g de mortier dans la boîte qui a été pesée au préalable, avec son couvercle, à $\pm 0,5$ g.

Mettre en place le couvercle en s'assurant qu'il assure l'étanchéité.

Remplir l'étui pour thermomètre de $(2,5 \pm 0,5)$ cm³ d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.

Peser la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle.

Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon. Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture.

Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic.

Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6min.

En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g.

En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

IV-4-3-5 Résistances à la compression :

- **Essai de compression :**

La machine utilisée est une presse hydraulique décrite par la norme NF EN 196-1.

Les demi prismes de l'éprouvettes obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure ci-dessous :

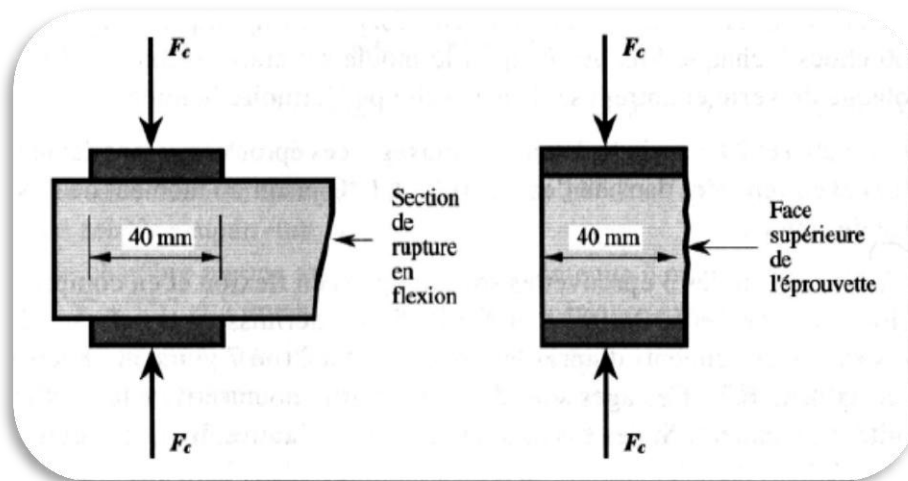


Figure IV-21 : Résistances à la compression.

$$R_c \text{ (Mpa)} = F_c / 1600 \text{ (N /mm}^2\text{)}$$

Où :

R_c : la résistance à la compression, en newtons par millimètre carré.

F_c : la charge maximale à la rupture, en newtons.

1600= 40 mm x 40 mm est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètres carrés.

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 Mpa près et on fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée.

➤ Les résultats des essais effectués :

Matine CEM II/B 42,5										
Type des ciments	CEM II/B 01	CEM II/B 02	CEM II/B 03	CEM II/B 04	CEM II/B 05	CEM II/B 06	CEM II/B 07	CEM II/B 08	CEM II/B 09	CEM II/B 10
SSB (cm ² /g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600
La masse Volumique absolue (g/cm ³)	3,15	3,13	3,11	3,08	3,06	3,05	3,02	3,00	2,98	2,95
consistance normale E/C (%)	27,8	28,4	28,6	28,7	28,8	29	29,2	29,5	29,8	30,2
Début de Prise (min)	210	210	205	195	190	185	175	165	140	120
Fin de Prise (min)	295	290	285	275	270	260	240	220	205	195
Expansion (mm)	2	1,8	1,7	1,6	1,5	1,2	1,1	1,1	0,9	0,8
Chaleur D'hydratation (j/g)	230,2	235,2	241,7	255,2	262,8	267,5	302,5	325,4	352,2	362,2

Tableau IV-13 : Résultats des essais sur le ciment CEM II/B.

Type des ciments	CEM II/B 01	CEM II/B 02	CEM II/B 03	CEM II/B 04	CEM II/B 05	CEM II/B 06	CEM II/B 07	CEM II/B 08	CEM II/B 09	CEM II/B 10
SSB (cm ² /g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600
Retrait 03j (µm/m)	102	141	152	178	188	200	212	225	249	305
Retrait 07j (µm/m)	195	295	333	375	388	419	425	471	501	523
Retrait 28j (µm/m)	601	635	685	712	750	828	878	890	912	922
Gonflement 03j (µm/m)	12,1	16,8	21,5	21,5	34,2	44,2	54,2	56,2	57,5	74,5
Gonflement 07j (µm/m)	33,5	43,5	52,2	66,2	78,2	87,1	93,5	103,2	112,2	117,4
Gonflement 28j (µm/m)	79,6	111,2	121,4	135,2	145,2	152,2	161,1	165,2	174,1	188,5
Rc 02j (MPa)	19,00	19,50	20,10	21,20	21,50	22,90	23,20	24,20	22,70	20,20
Rc 07j (MPa)	32,10	32,90	33,60	34,50	36,70	38,90	39,20	40,20	37,20	33,30
Rc 14j (MPa)	37,20	37,70	38,50	39,10	41,30	43,50	44,50	45,00	41,90	37,80
Rc 28j (Mpa)	43,50	44,10	44,60	45,90	46,20	47,60	47,90	48,50	47,30	44,70

Tableau IV-14 : Résultats des essais sur le mortier.

Serie CEM II/A 52,5

Type des ciments	CEM II/A 01	CEM II/A 02	CEM II/A 03	CEM II/A 04	CEM II/A 05	CEM II/A 06	CEM II/A 07	CEM II/A 08	CEM II/A 09	CEM II/A 10
SSB (cm ² /g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600
La masse volumique absolue (g/cm ³)	3,14	3,12	3,11	3,09	3,06	3,04	3,03	3,02	3,00	2,98
consistance normale E/C (%)	29	29,2	29,4	29,6	29,8	30	30,2	30,6	31,2	32,2
Début de Prise (min)	200	190	185	185	180	170	160	135	130	110
Fin de Prise (min)	275	270	265	255	245	235	220	215	210	200
Expansion (mm)	0,8	0,9	1,1	1,2	1,2	1,3	1,5	1,5	2	2
Chaleur D'hydratation (j/g)	275,5	295,5	312,2	340,3	350,2	389,5	391,2	393,5	394,5	396,6

Tableau IV-15 : Résultats des essais sur le ciment CEM II/A.

Type des ciments	CEM II/A 01	CEM II/A 02	CEM II/A 03	CEM II/A 04	CEM II/A 05	CEM II/A 06	CEM II/A 07	CEM II/A 08	CEM II/A 09	CEM II/A 10
SSB (cm ² /g)	3000	3200	3500	3800	4100	4400	4700	5000	5300	5600
Retrait 03j (µm/m)	145	160	175	180	185	195	200	253	262	260
Retrait 07j (µm/m)	268	271	279	285	310	400	444	451	467	459
Retrait 28j (µm/m)	641	677	682	720	752	922	956	966	955	950
Gonflement 03j (µm/m)	14,2	20	23,2	22	23,5	42,2	53,2	49,5	52,2	62,5
Gonflement 07j (µm/m)	32,5	42,2	51,2	54,1	76,3	85,2	91,2	101,2	110,3	109,2
Gonflement 28j (µm/m)	67,2	105,2	112,2	122,2	133,6	149,2	158,7	161,4	165,5	178,5
Rc 02j (MPa)	26,20	27,00	27,50	28,00	29,30	30,20	31,70	32,50	31,10	30,10
Rc 07j (MPa)	42,50	43,20	43,60	44,00	45,10	46,80	47,00	47,50	45,90	44,70
Rc 14j (MPa)	31,20	32,00	32,50	33,00	34,30	35,20	36,70	37,50	36,10	35,10
Rc 28j (Mpa)	52,50	53,30	53,80	54,30	55,60	56,50	58,00	58,80	57,40	56,40

Tableau IV-16 : Résultats des essais sur le mortier.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait plusieurs expérimentations sur différents matériaux, par différentes méthodes des essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique.

CHAPITRE V :
RESULTATS ET
INTERPRETATION

Chapitre V : Résultats et Interprétation

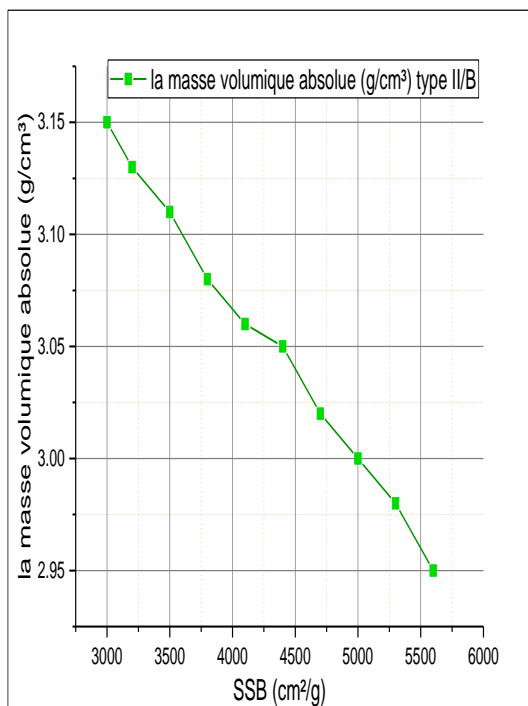
Introduction :

Dans ce chapitre on présente les différents résultats expérimentaux des essais effectués interprétations.

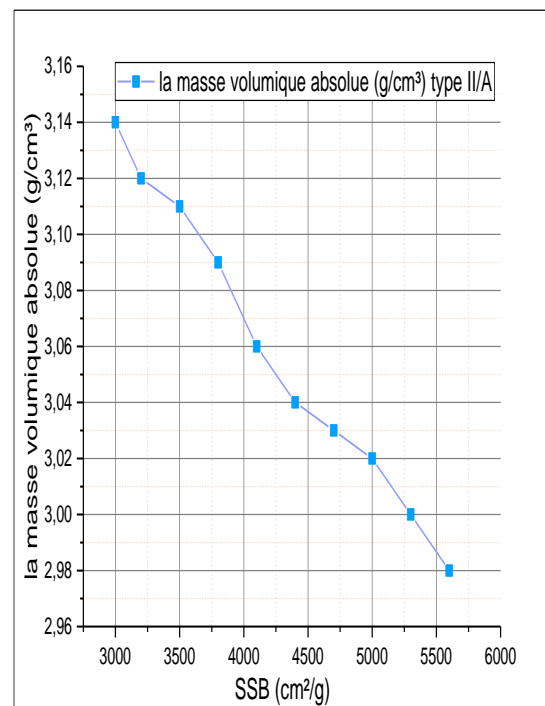
V-1 Influence de la finesse sur le poids spécifique des ciments :

D'après les résultats obtenus (figure V-1), on remarque une diminution de la masse volumique absolue au fur et mesure que la finesse de mouture augmente.

Une grande proportion de vides (diminution du poids spécifique) que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pâte de ciment (porosité élevée).



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V-1 : Variation du poids spécifique du ciment (a et b) en fonction de la finesse de mouture.

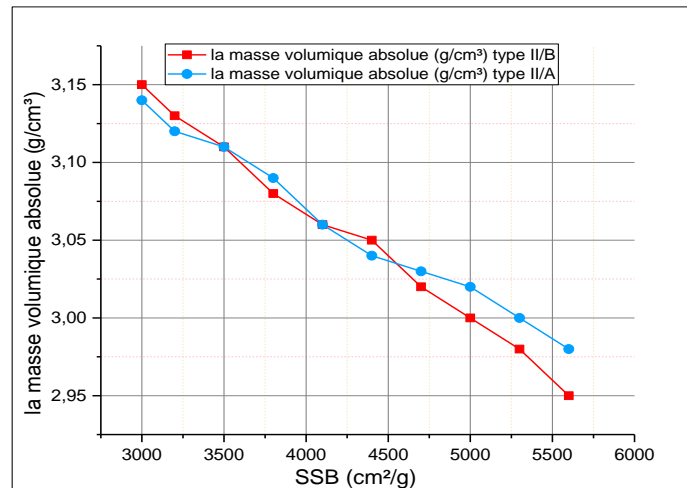


Figure V-2 : Variation du poids spécifique du ciment type (a et b) en fonction de la finesse de mouture.

- D'après la figure V-2 on remarque que le point spécifique présente la même évolution pour le ciment avec des valeurs semblable avec 3.15 à 2.95 pour CEM II/B et 3.14 à 2.98 pour le CEM II/A pour la finesse comparée entre 3000 à 5600 cm²/g.
- Pour les finesses supérieure 5000 cm²/g la masse volumique CEM II/A supérieure à celle de ciment CEM II/B à un pourcentage (0.67 à 1.1 %).

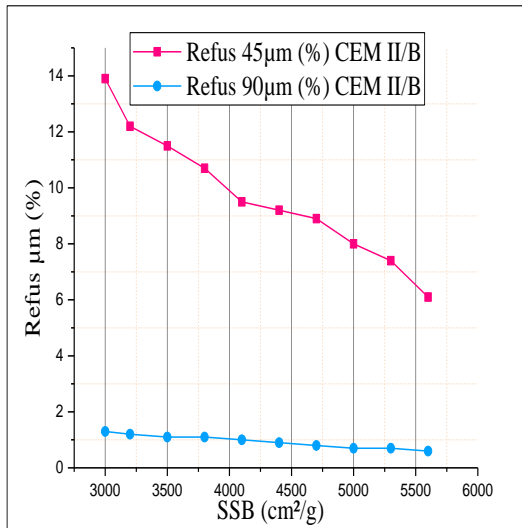
V-2 Analyse granulométrique par la méthode alpine:

Les résultats expérimentaux obtenus (Figures V-3) présentent l'effet du taux d'ajout (calcaire) sur l'analyse granulométrique à 45 μm et 90 μm.

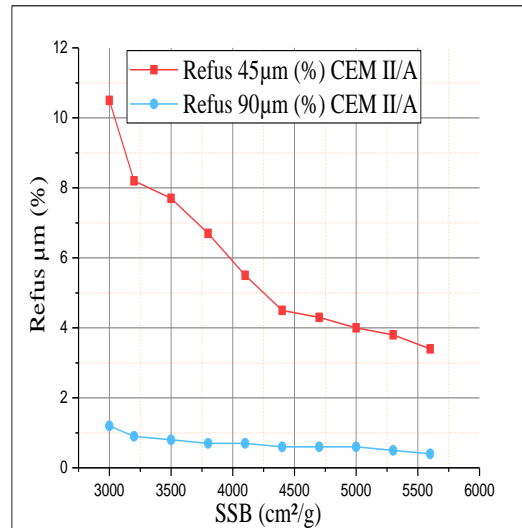
L'augmentation de la surface spécifique dans les ciments préparés diminue la granulométrie de ciment, on constate que le calcaire utilisé dans cette étude de bonne broyabilité.

V-2-1 La relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :

La relation entre la surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse avec l'augmentation du taux d'ajout calcaire. L'augmentation du taux d'ajout calcaire augmente la surface spécifique et diminue la granulométrie de ciment.



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V-3 : Effet de la surface spécifique sur l'analyse granulométriques (ALPINE).

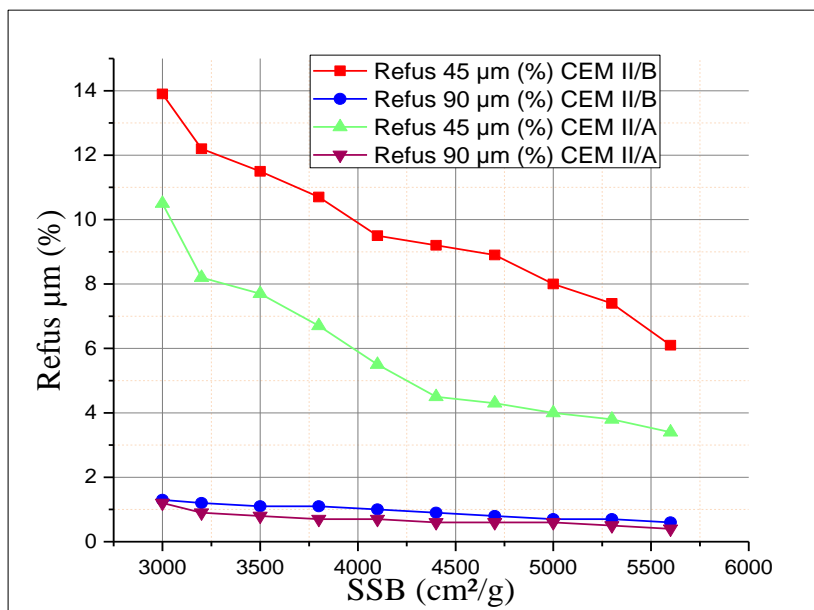


Figure V-4 : Effet de la surface spécifique sur l'analyse granulométriques (ALPINE).

D'après la (figure V-4) on remarque que le refus présente une différence presque stable d'un pourcentage (3%). Mais avec la supériorité de CEM II/B par rapport au CEM II/A.

V-3 Influence de la finesse sur la pate des ciments :

V-3-1 Influence de la finesse du ciment sur la consistance :

D'après les résultats obtenus (figures V-5), on remarque que l'augmentation de la finesse du ciment a un effet :

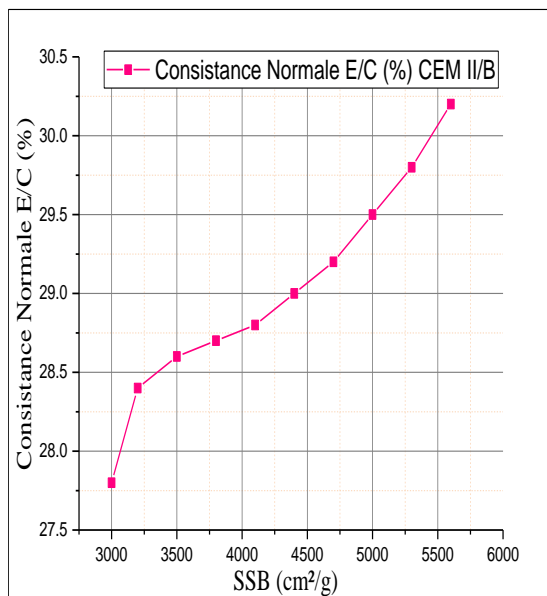
Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte du liant.

On remarque aussi que la granulométrie (distribution des grains) du ciment, a une influence prédominante sur la demande en eau du ciment, ceci se traduit par :

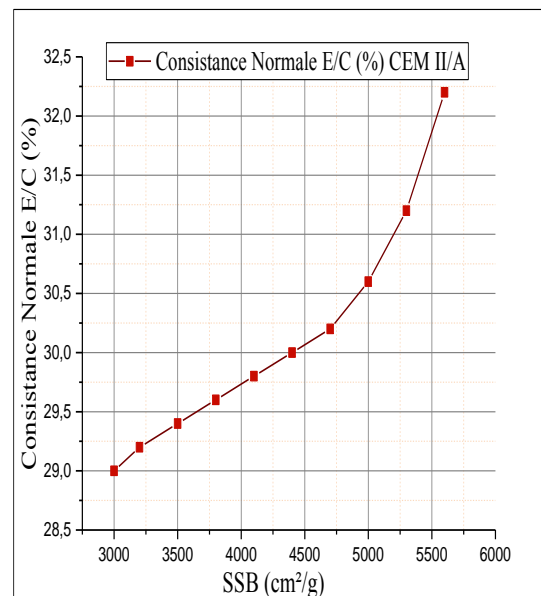
✓ une augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller au fur et à mesure que le ciment étudié est broyé plus finement.

Le principale comparaison tirée entre les différents types de ciments étudiés :

On remarque que la demande en eau des deux ciments étudiés n'est pas la même, la plus élevée est celle du CEM II/B et la plus faible est celle du CEM II/A, ceci est du principalement à la différence de leurs granulométries. Plus la distribution granulométrique est "serrée" avec peu de particules de petites et de grosses dimensions, plus la demande en eau est élevée, ce qui est le cas pour la demande en eau des deux ciments étudiés.



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V-5 : Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture.

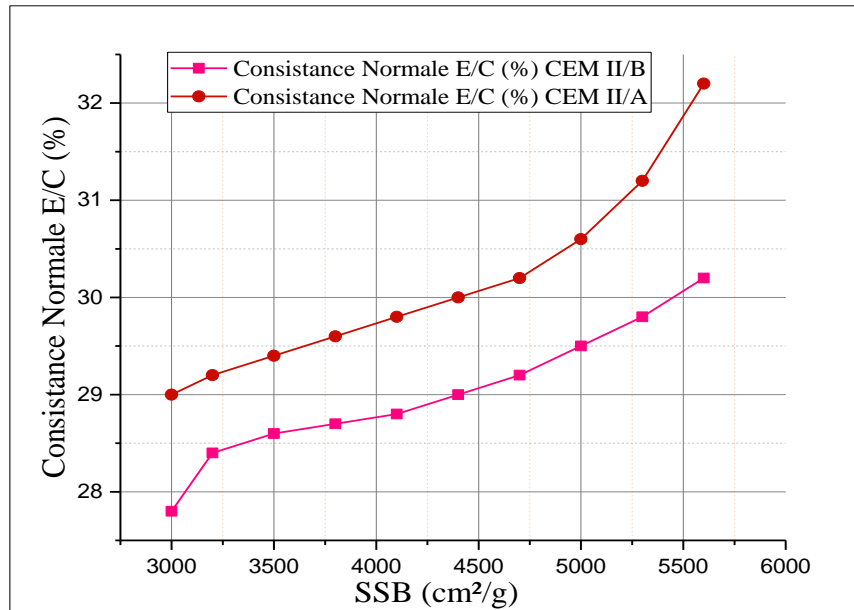


Figure V-6 : Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment type (a et b) en fonction de la finesse de mouture.

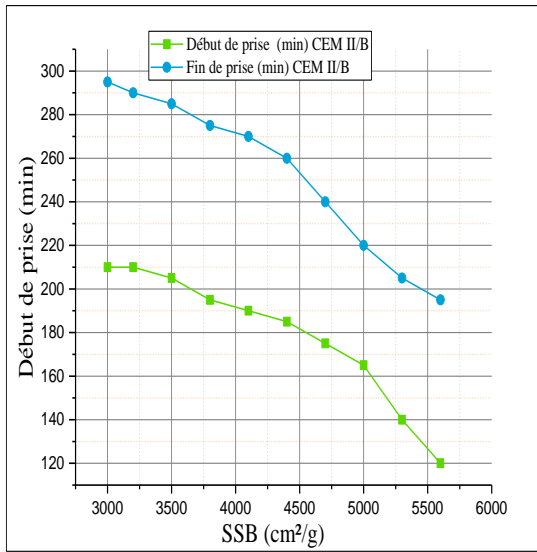
La figure V-6 présente l'évolution de la consistance normale de la pâte des deux type de ciment avec une supériorité du CEM II/A d'une valeur de (2 %) à partir d'une finesse de 5000 cm²/g.

V-3-2 Influence de la finesse du ciment sur la prise :

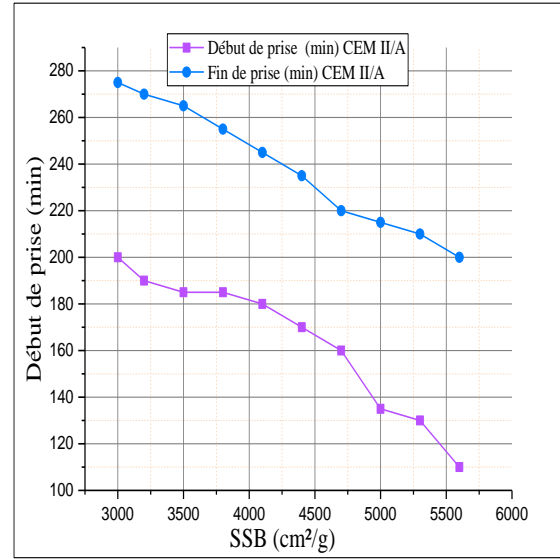
D'après les résultats expérimentaux obtenus (Figures V-7), on remarque que l'augmentation de la finesse du ciment a un effet.

- Raccourcissement des délais (temps) de prise.
- La diminution de temps début et la fin de prise et liée à l'augmentation de la surface spécifique du ciment.

De même, on remarque que les temps de début et de fin de prise diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture des ciments, cela s'explique par le fait que la réaction pouzzolanique est accélérée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus rapide en fonction de l'augmentation de la finesse. Par conséquent les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en grande quantité aux très jeunes âges.



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V-7 : Evolution du temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture.

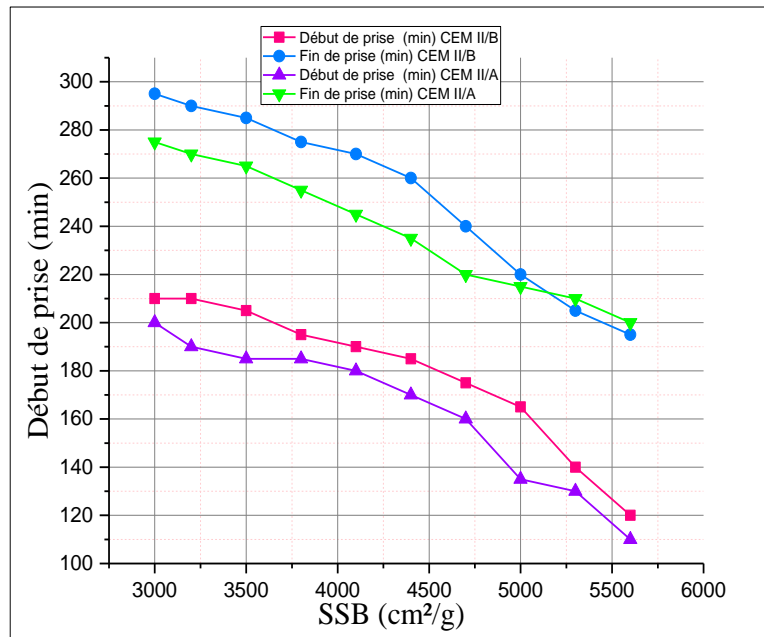


Figure V- 8 : Evolution du temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment (a et b) en fonction de la finesse de mouture.

D'après cette (figure V-8) , on remarque que l'évolution du temps de début et fin de prise atteint la moindre valeur d'une surface spécifique 5600 cm²/g.

- CEM II/A présente un début et fin de prise inférieure à celle de ciment CEM II/B.

V-4 Influence de la finesse du ciment sur la stabilité :

Les résultats des Figures V-9 et V-10 indiquent que l'expansion à chaud (hydratation accélérée par traitement thermique à 100 ° C) augmente avec l'augmentation du taux de calcaire d'une façon relativement linéaire et n'a pas d'effet significatif sur la stabilité du ciment et reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme EN 196-3 qui est de 10 mm.

Cette augmentation de l'expansion peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que la chaux libre et le MgO qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevée.

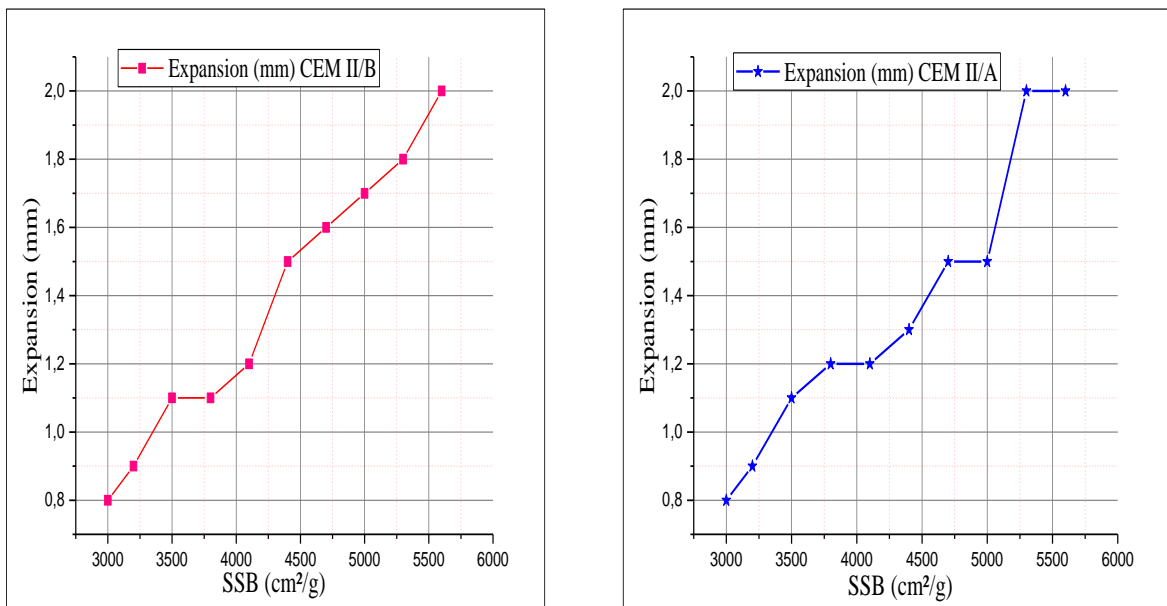


Figure V-9 : Evolution de l'expansion du ciment en fonction de la finesse de mouture.

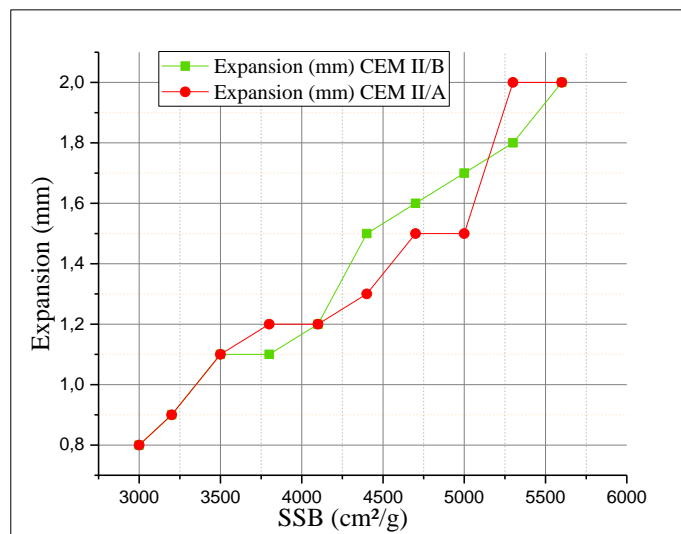


Figure V-10 : Evolution de l'expansion du ciment (a et b) et en fonction de la finesse de mouture.

On remarque aussi que les deux types de ciment sont stables car ils présentent une expansion inférieure à 10 mm (2mm).

V-5 Influence de la finesse sur le mortier normale :

V-5-1 Influence de la finesse du ciment sur le retrait et le gonflement :

Les résultats de mesure du retrait, et du gonflement que provoquent les ciments étudiés sur des éprouvettes de mortier normal sont présentés dans les figures V-11, V-12, V-13 et V-14.

D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que tous les ciments étudiés provoquent retraits et gonflements sur les éprouvettes des mortiers étudiés.

Les mesures de retrait à 28 jours sont conformes à la norme NF P 15-433 qui spécifie les retraits pour les ciments «CPJ-CEM II» doivent être :

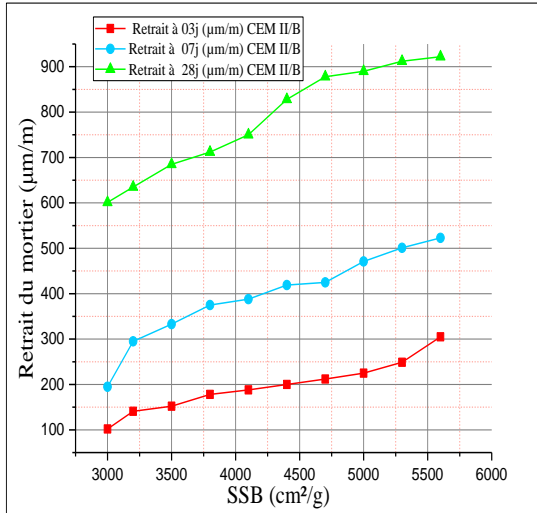
- $\leq 800 \mu\text{m/m}$ pour la classe 32,5 et
- $\leq 1000 \mu\text{m/m}$ pour la classe 42,5.

On Remarque aussi :

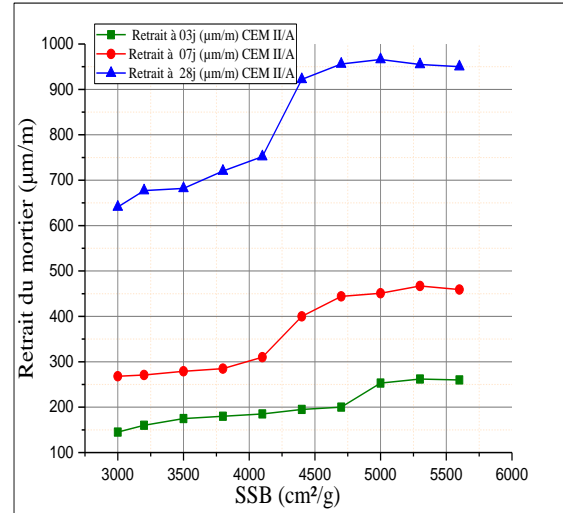
- L'augmentation du retrait en fonction de l'âge de durcissement (3, 7 et 28 jours).
- L'augmentation du retrait en fonction de variation de la finesse de mouture du ciment.

- L'augmentation du retrait observé en fonction de l'âge de durcissement, est due à la création d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté. La consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque un assèchement se produisent des forces d'attractions qui provoquent le retrait.

- L'augmentation du retrait en fonction de la finesse, est due à une porosité capillaire élevée.
- Le gonflement observé est dû à la constitution d'hydrates massifs comme la portlandite Ca(OH)_2 . Il est en relation avec la taille des cristaux de Portlandite.



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V- 11 : Evolution du retrait du mortier en fonction de la finesse de mouture.

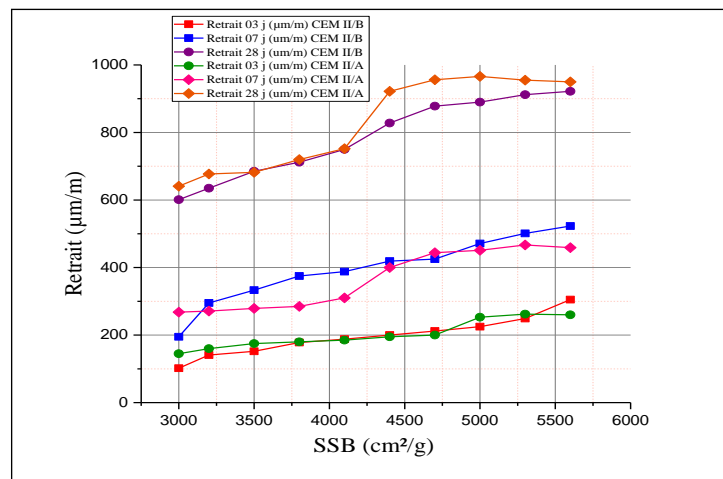
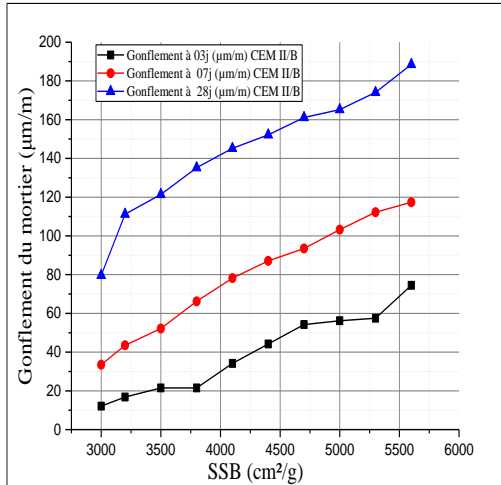
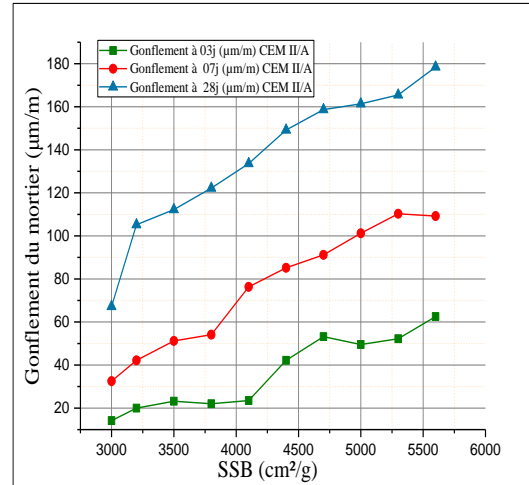


Figure V-12 : Evolution du retrait du mortier en fonction de la finesse de mouture.



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V-13 : Evolution du gonflement du mortier en fonction de la finesse de mouture.

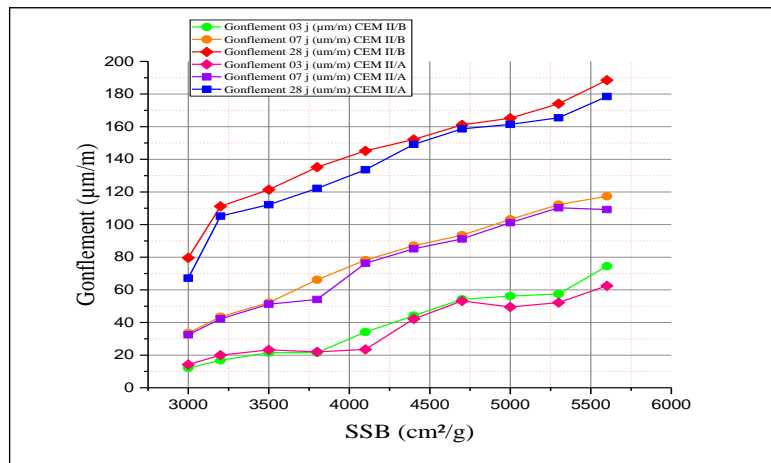


Figure V-14: Evolution du gonflement du mortier en fonction de la finesse de mouture.

V-6 Comportement mécanique du mortier à base de sable normalisé :

Les résultats l'essai mécanique (compression) réalisés sur des éprouvettes de mortier à base de sable normalisé avec différentes finesses de mouture des ciments composés utilisés à des âges (2, 7, 14 et 28 jours) de durcissement ; sont présentés respectivement dans les figures V-15 , V-16.

V-6-1 Influence de la finesse du ciment sur la résistance mécanique du mortier :

Les résultats obtenus sont représentés respectivement par les figures V-15 à V-16. D'après les résultats obtenus, on remarque que :

- La résistance augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de ciment jusqu'à (5000 cm^2/g) pour deux types de ciment à partir de la finesse de 5000 cm^2/g (d'après les figures V-15, V-16) une chute de la résistance pour tous les âges de durcissement. Cette chute est due à la destruction des silicates bicalciques (C₂S) et tricalciques (C₃S) responsables des résistances à 28 jours ;
- Le CEM II/A de la résistance préservée a CEM II/B ;
- L'augmentation de la surface spécifique du ciment entraîne un accroissement des résistances mécaniques. C₃S et C₂S sont les deux minéraux qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme ;
- L'augmentation de la surface spécifique du ciment améliore les résistances mécaniques du mortier. Ceci explique l'activation mécanique de la finesse de mouture ;
- La faiblesse des résistances à court terme peut être compensée par l'activation mécanique (augmentation de la finesse de mouture).

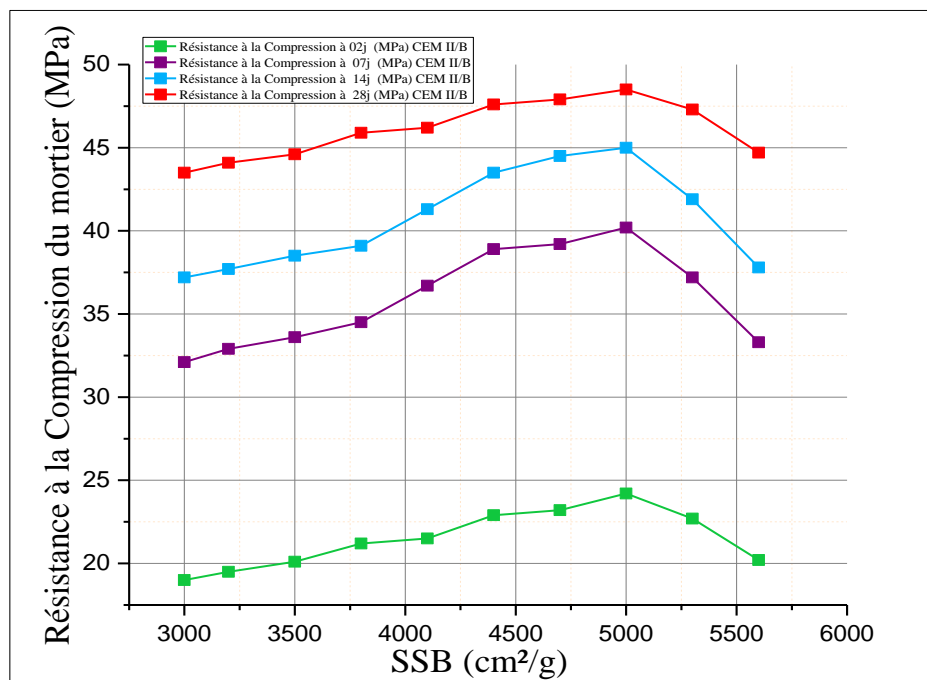


Figure V-15 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture.

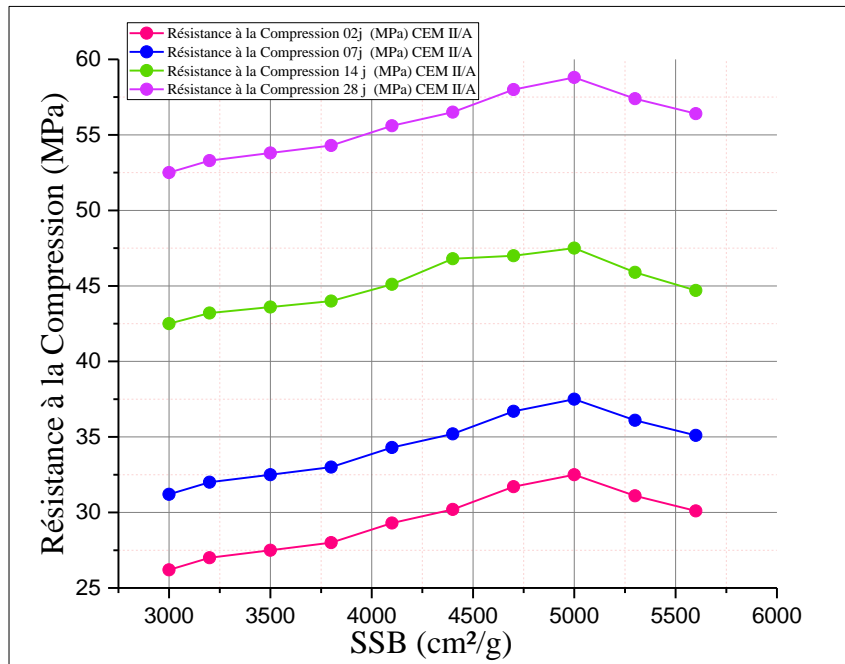


Figure V-16 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture.

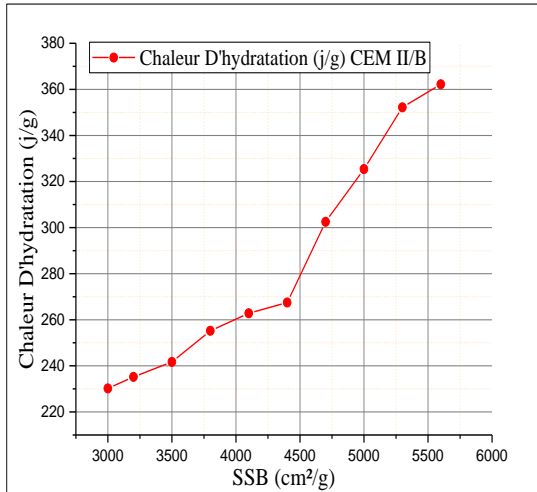
V-7 Influence de la finesse du ciment sur la chaleur d'hydratation :

Les résultats expérimentaux obtenus (Figure V-17, V-18) présentent influence de la finesse sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalisé.

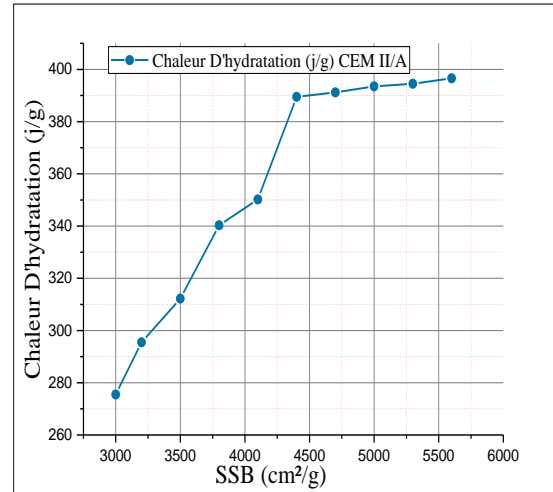
- On remarque que le dégagement de chaleur d'hydratation augmente proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture des ciments.
- La chaleur d'hydratation augmente avec l'augmentation de surface spécifique de ciment pour chaque type de ciment.
- Le ciment CEM II/A présente une chaleur d'hydratation plus élevées à celle du ciment CEM II/B.

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

- La nature et taux d'ajout utilisé dans le ciment dans notre cas le calcaire.
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminate tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- la température extérieure.



(a):Ciment CEM II/B



(b):Ciment CEM II/A

Figure V-17 : Evolution de la chaleur d'hydratation des mortiers en fonction de la finesse de mouture.

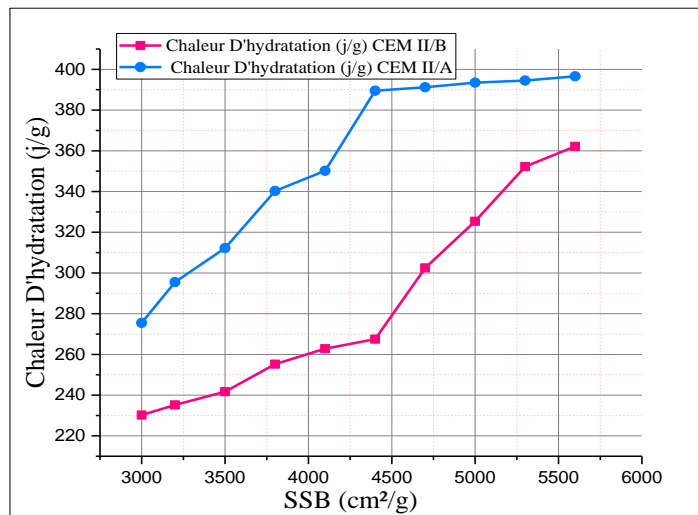


Figure V-18 : Evolution de la chaleur d'hydratation des mortiers en fonction de la finesse de mouture.

D'après cette (figure V-18), on remarque que l'évolution de la chaleur d'hydratation enregistre une différence presque de (55 j/g) pour les deux ciments (CEM II/B et CEM II/A)

V-8 Effet de la chaleur d'hydratation sur le temps de prise :

D'après les figures V-19, On remarque que la chaleur d'hydratation augmente par rapport à l'augmentation de la surface spécifique de ciment et le temps de prise diminue.

La chaleur d'hydratation des ciments dépasse la valeur caractéristique de 270 j/g selon la Norme NA 442 donc les ciments dite (ciment normale).

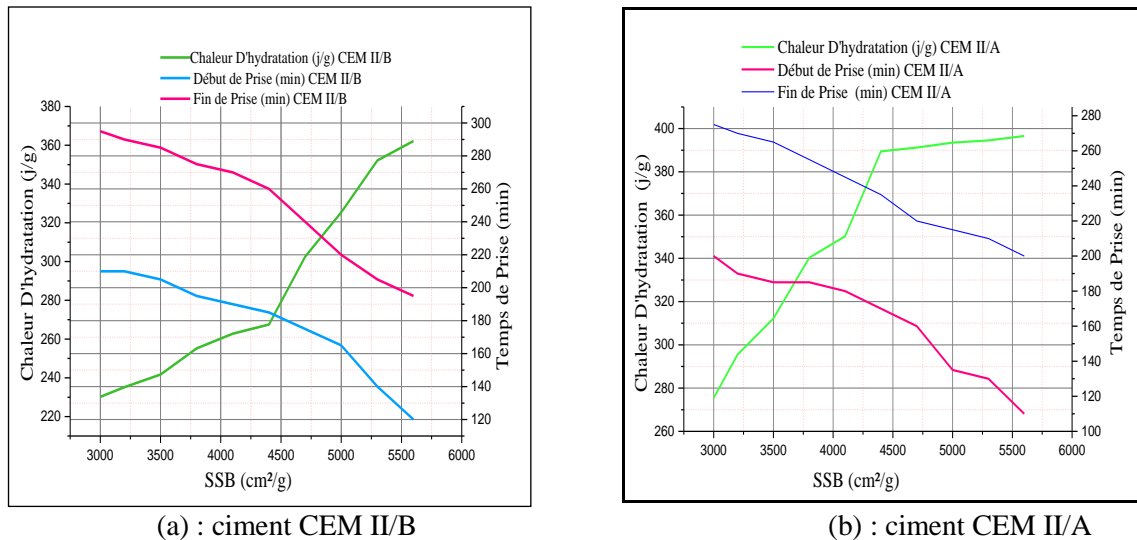


Figure V-19 : Evolution de la chaleur d'hydratation des mortiers et temps de prise en fonction de la finesse de mouture.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a déduit que l'addition naturelle comme le calcaire a un effet sur les caractéristiques physiques et chimiques du ciment (la surface spécifique, la consistance, le délai de prise, stabilité et la chaleur d'hydratation). Quand l'addition de calcaire au ciment augmente la surface spécifique et la consistance augmente. Le délai de prise diminue et la résistance à la compression augmente avec l'évaluation de la surface spécifique.

CONCLUSION
GENERALE :

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale :

Les ciments aux ajouts minéraux sont de plus en plus utilisés pour la confection des matériaux cimentaires pour plusieurs raisons, soit écologiques, soit économiques, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

Le ciment portland composé avec ajout minéral, se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (CEM II) nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique, mécanique (broyage poussée) au liant hydraulique.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la finesse (surface spécifique) des ciments avec ajout minérale sur la résistance mécanique du mortier. Ce travail est une contribution à l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques d'un mortier par l'augmentation dans la surface spécifique afin d'atteindre des valeurs optimales on utilise des deux types de ciments (CEM II/B et CEM II/A).

Les divers résultats présentés dans ce mémoire précisent clairement l'influence majeure de l'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux (CEM II/A et CEM II/B) sur la cinétique d'hydratation des ciments (consistance et délais de prise), sur les propriétés mécaniques des mortiers et aussi sur les variations dimensionnelles (retrait) et volumiques (gonflement) des pâtes de mortiers testés.

Les résultats obtenus dans cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- On peut dire que la masse volumique absolue diminue en fonction de l'augmentation de la surface spécifique ;
- Il existe une relation inverse entre la surface spécifique et l'analyse granulométrique pour chaque augmentation de la surface spécifique de ciment l'analyse granulométrique diminue ;
- L'augmentation de la finesse des ciments composés influe sensiblement sur la demande en eau de consistance normale ;
- Le temps de début et de fin de prise diminue proportionnellement avec l'augmentation de la finesse des ciments composés ;

Conclusion générale

- L'augmentation de l'expansion peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que la chaux libre et le MgO qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevée, des variations dimensionnelles et volumiques (retrait et gonflement) du mortier ;
- L'augmentation du retrait et du gonflement sont proportionnelle à l'augmentation de la surface spécifique de ciment ;
- L'augmentation du retrait en fonction de la finesse, est due à une porosité capillaire élevée ;
- L'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux présente deux avantages essentiels : une bonne résistance mécanique du mortier ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée aux premiers âges de durcissement (à court terme) avec des variations dimensionnelles et volumiques (retrait et gonflement) ;
- L'influence de la finesse des ciments aux ajouts cimentaires (calcaire) sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux (ciments, mortiers).
- Le dégagement de la chaleur d'hydratation augmente proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture des ciments.

Enfin, les ciments aux ajouts minéraux doivent être finement broyés (SSB supérieure à 4000 jusqu'à 5000 cm^2/g) afin d'accélérer la cinétique d'hydratation des ciments à court terme (amélioration de la réactivité des ajouts minéraux cimentaires) et assurer une bonne résistance mécanique.

Les perspectives :

Nous proposons les axes de recherche suivants :

- ❖ Analyse microstructurale par diffraction aux rayons X (DRX) et observation des faciès au microscope électronique à balayage, des pâtes de ciments composés à différents temps de durcissement (contrôle de la formation de l'étringite, de la portlandite et des CSH).
- ❖ Influence du rapport E/C et du mode de conservation sur la réponse mécanique du mortier à base de ciment aux ajouts minéraux.
- ❖ Etude de l'influence des méthodes d'activation (chimique et thermique) des ajouts minéraux cimentaires (calcaire).

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Références :

- [1]-S. Catinaud, Durabilité à long terme de matériaux cimentaire, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines, thèse du doctorat, Université de LAVAL Canada, décembre 2000.
- [2]-NF P 15-301, Liants hydrauliques, Ciments courants: Composition, spécifications et critères de conformité, Paris, pp. 1-11, Juin 1994.
- [3]-R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Sain-Arroman, Granulats, sols, ciment et béton, 2ème Edition, Casteilla, ISBN 2713514711, 1995.
- [4]-W. H. Duda, Cement data book, 3rd édition; French & European Pubns Ed, ISBN 0828802041, décembre 1985.
- [5]-C. Avenier, B. Rosier, D. Sommain, Ciment naturel, Grenoble, Glénat éd, ISBN10 : 2723461580, 176 p, 2007.
- [6]-J. BROCARD, Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment, Tome I, Librairie Aristide Quillet, 1972, P 813,815.
- [7]-Jean Fasta, Georges Dreux, nouveau guide du béton et ses constructions 8ème Edition, Eyrolles, 2007.
- [8]-Cours en ligne, Matériaux de construction, Agence universitaire de la francophonie. Université nationale RDP Lao. Disponible sur: <http://www.la.refer.org/>
- [9]-M. Venuat, La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers », édition2, Collection Moniteur, 277p, 1989.
- [10]-J. Baron, JP. Olivier et J.C.Weiss, « Les ciments courants », « Les bétons, bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles, 806p, 1997.
- [11]-Stutzman. P, (2004) Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure, Cement and Concrete Composites, 26: 957-966.
- [12]-BELHOCINE.A, NAGOUDI.N, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts Minéraux, Mémoire de Master Université KASDI Merbah d'Ouargla, Algérie, 2014.
- [13]-ERCE, CTC, est GRANITEX, « Ciments – Bétons – Adjuvants », Journée D'information, 2004.
- [14]-Georges Dreux, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième Édition Eyrolles 2002, p32-38.

Références bibliographiques

- [15]-Chistion. L, mise en œuvre et emploi des matériaux de construction, édition Eyrolles 61-bd saint-germain :75240 paris.
- [16]-L. PLISKIN, « La fabrication du ciment », Edition Eyrolles, 217p, Paris, 1993.
- [17]-A. Tagnit et P-C Nkinamu banzib, Les ajouts cimentaires et le développement Durable, Département de génie civil, Université de Sherbrooke.
- [18]-Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland, 210p, October 1998.
- [19]-M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87,1975.
- [20]-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.
- [21]-Y. Older, « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th , 1998.
- [22]-R. Gane, « Cours de durabilité et Réparation des bétons », Chapitre 2, Université de Sherbrooke, p32, Canada, 2002.
- [23]-R. Kara Ali, "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires", Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2002.
- [24]-Jean Festa, Georges Dreux, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009.
- [25]-Anissa Bessa-Badreddine, Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [26]-Djobo Yankwa, Jean Noël, effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolyinères a base scories volcanique.
- [27]-Norme SIA 215, "Liants minéraux", Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zurich, 1978.
- [28]-A.Komar, " Matériaux et éléments de construction" Edition MIR , pp 1-56, Moscou 1976.
- [29]-Sophie Husson, Etude physicochimique et mécanique des interactions ciment, Application aux mortiers, Chemical and Process Engineering, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1991, French.

Références bibliographiques

- [30]-R. Sersale, « Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI- 17ème Congrè International de la chimie des ciments, Volume 1, Paris 1980.
- [31]-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-Fév. 1996.
- [32]-Meukam. P, « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.
- [33]-Dreux .G & J. Festa: «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition. Eyrolles. Mai 1998.
- [34]-Manai K., Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [35]-Bétons et mortiers- préparation et mise en œuvre sur le chantier
- [36]-cours MDC, licence université de m'sila
- [37]-CIM BETON, les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Tome2, 137p janvier 2013,
- [38]-D.William, Callister.JR « Science et génie des matériaux » modolu Editeur, 2001.
- [39]-R. dupain, R. Lanchon, J-C. Saint-Arroman « Granulat, sols, ciment et béton » Edition casteilla, Paris, 2004.
- [40]-Arezki Tagni Hamou «Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, chapitre 8 ».
- [41]-GCI712 « Durabilité et réparation du béton », département Génie civil, Université de Sherbrooke-Canada, Avril, 2009.
- [42]-P. Sylver, science des matériaux, université pierre et marie curie 2005, 2006.

ANNEXES

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO²) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al²O³) et le fer (Fe²O³). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement,. .etc.) ;
- Secteur industriel.



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



السريع

EL SARIE

ALGÉRIE



La performance et rapidité pour ouvrages exigeants

CPJ-CEMII/A-L 52,5 N

CONDITIONNEMENT EN VRAC



EL SARIE

Ciment gris pour bétons ; destiné aux constructions de résistance élevée résultat de 80-95 % de clinker ainsi que des ajouts secondaires entre 0 et 5%. Le gypse est ajouté pour réguler la prise du ciment

EL SARIE

CPJ-CEMII/A-L 52,5 N

EL SARIE

La composition et les caractéristiques du ciment sont conformes aux normes en vigueur, en l'occurrence la NA 442



AVANTAGES PRODUIT



- Ciment avec classe vraie élevée et un faible retrait
- Un gain très important en résistance dans le temps
- Une compatibilité accrue avec les adjuvants présents sur le marché (plastifiants, retardateurs de prise, accélérateurs de prise et de durcissement...)

DOMAINES D'APPLICATION :



- Ponts, viaducs, tunnels etc.
- Infrastructures (fondations) et éléments de superstructure nécessitant un décoffrage rapide.
- Ouvrages d'art nécessitant des résistances élevées
- Éléments structuraux en béton Post et précontraint
- Éléments Monolithiques entrants dans les travaux publics et industriels.
- Préfabrication lourde.



CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES



• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	5.0-9.0
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5-3.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 4.0
Teneur en Chlorures (%) (NA 5042)	Max 0.1

• Composition hypothétique du clinker (Bogue)

	Valeur
Aluminates tricalciques C ₃ A (%)	6.0-9.0

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale de la pâte de ciment (%)	25.0-31.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231)	3800-4800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1000
Expansion en mm	0.3-2.5

• Temps de prise à 20° (NA 234)

	Valeur
Début de prise (min)	100-170
Fin de prise (min)	150-250

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 20.0
28 jours (MPa)	≥ 52.5

LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com



Résumé:

Les ajouts minéraux font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques et chimiques (durabilité) des matériaux cimentaires (mortier et béton).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, poids spécifique, finesse, consistance des pâtes de ciment, chaleur d'hydratation, et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de la surface spécifique et la composition (chimique et minéralogique) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement des résistances mécaniques des mortiers.

Mots-clés : Finesse (surface spécifique), ajouts minéraux (calcaire), ciment, mortier, résistance mécanique.

ملخص:

إن تدعيم استعمال الإضافات الإسمنتية هي حاليا جزء من التطورات الأخيرة في إنتاج الاسمنت مما أدى إلى تحسن كبير للخصائص الميكانيكية للمواد الإسمنتية (الخرسانة و المونة). وعلاوة على ذلك، إن استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية.

إن الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للإسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة في الحالة الجافة و المبللة (التركيب الكيميائي، الوزن النوعي، النعومة، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية، زمن التصلب) وكذلك مميزات المونة في حالة تصلبها منها التقلص الانتفاخ تم تحديدها خلال هذه الدراسة.

من خلال النتائج التجريبية المحصل عليها نستنتج أن الزيادة في النعومة (المساحة السطحية النوعية) وكذلك التركيب الكيميائي والمعدني للإسمنت ذات الإضافات المعدنية يمثلان السبب الرئيسي في تحسين التفاعل البطيء لإضافات المعدنية وزيادة المقاومة الميكانيكية للمونة.

الكلمات المفتاحية : المساحة النوعية السطحية (النعومة), الإضافات المعدنية (الحجر الجيري), الاسمنت, المونة, المقاومة الميكانيكية.

Abstract:

The mineral additions currently form part of the most recent developments in the production of cement, because their uses make a improvement of the mechanical properties and chemical (durability) of cementing materials (mortar and concrete).

In addition their uses aim to reduce the clinker consumption, while contributing in a way simple and economic to solve the problems involved in the environment.

The physicochemical properties of cement in an anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, unit weight, smoothness, consistency of the cement pastes and time of catch), as well as the characteristics of the mortars ready-mixed at their bases, such as, the withdrawal, swelling, the mechanical behavior (mechanical resistances to compression) were studied.

According to the experimental results obtained, it arises that the increase in surface specific and the composition (chemical and mineralogical) of cements to the mineral additions are the principal persons in charge with the improvement of the latent reactivity of the mineral additions and the increase in the mechanical resistances of the mortars.

Key words: Smoothness (specific surface), additions mineral (limestone), cement, mortar, mechanical resistance.