



N° d'ordre:

UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité: *GENIE CIVIL*

Option: *MATERIAUX*

Par

BOUGLADA Mohamed Salah

SUJET

**Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral
par la chaux fine sur le comportement mécanique
du mortier**

Soutenu publiquement le/...../..... devant le jury composé de:

**M. BEDDAR
A. NACERI
Z. BOUDAUD
A. BENOUIS
L. BELAGRAA**

**Maître de conférences
Maître de conférences
Maître de conférences
Maître de conférences
M.A.C.C**

**Université de M'sila
Université de M'sila
C.U. d'Oum-El-Bouaghi
Université de Guelma
C.U. de B.B.A**

**Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité**

Année 2007 / 2008

REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée au sein du département de génie civil de l'université de « MOHAMED BOUDIAF » de M'sila

Je tiens à remercier :

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

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

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

Monsieur BENOUIS Abdelhalim, Maître de conférences pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail malgré le trajet fatiguant et long pour rejoindre l'université de m'Sila.

Monsieur BELAGRAA Larbi, Maître assistant chargé de cours pour l'honneur qu'il m'a fait par sa participation et je tiens à lui exprimé mes profonds respects.

Je remercie Monsieur CHABONI Rachid, CHARA Ammar, du centre de recherche et du développement de la sonatrach « C.R.D » Boumerdes.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous le personnel des laboratoires des cimenteries de : AIN TOUTA, TEBESSA, AIN EL KEBIRA, HADJAR-SOUD, SOUR EL GHOZLANE et le laboratoire du LNHC de Batna

Je remercie très chaleureusement tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

EFFET DE L'ACTIVATION DU CIMENT AVEC AJOUT MINERAL PAR LA CHAUX FINE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU MORTIER

RESUME

L'utilisation d'ajouts pouzzolaniques a comme avantages des coûts moindres et une meilleure durabilité, mais a comme désavantages des temps de solidification plus longs et un développement de la résistance initiale plus lent. Le but de ce travail expérimental est d'évaluer l'influence de l'activant minéral (chaux hydratée) sur les propriétés physico-chimiques du ciment au laitier (hydraulicité latente) et le comportement mécanique du mortier (résistances mécaniques à la compression et à la flexion). La méthode d'activation par la chaux hydratée du ciment au laitier active le processus d'hydratation et modifie la taille des particules aux âges initiales de l'hydratation. Dans cette étude expérimentale, l'agent d'activation de prise Ca(OH)_2 est employé dans différentes proportions (0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10%) par diverses méthodes (substitution et addition par rapport au poids du ciment au laitier). Les propriétés physico-chimiques des ciments activés par l'hydroxyde de calcium à l'état anhydre et à l'état hydraté (composition chimique, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment et temps de prise) ainsi que le retrait, gonflement et la réponse mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion) du mortier à 7, 28 et 90 jours de durcissement ont été étudiés.

Mots-clés : Méthode d'activation, laitier, chaux, ciment, mortier, comportement mécanique.

EFFECT OF THE ACTIVATION OF CEMENT WITH MINERAL ADMIXTURE BY FINE LIME ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MORTAR

ABSTRACT

The use of the pozzolanic admixtures has the advantage of lower costs and better durability, but the disadvantage of a longer setting time and a slower early strength development. The aim of the experimental work is to evaluate the influence of mineral activator (hydrated lime) on the physico-chemical properties of slag cement (latent hydraulicity) and the mechanical behavior (Flexural and compressive strengths) for the mortar. The activation method by hydrated lime of slag cement activates the hydration process and influenced the size of particles at the early ages of hydration. In this experimental study, the setting agent Ca(OH)_2 is used in the proportions of 0%, 2%, 4%, 6%, 8% and 10% by various methods (substitution and addition by mass of slag cement). The physico-chemical properties of cements activated by the calcium hydroxide at anhydrous state and the state hydrated (chemical composition, specific weight, fineness, particle size distribution, consistency of the cement pastes, setting times, shrinkage and expansion) thus the shrinkage, expansion and the mechanical behavior (flexural and compressive strengths) for the mortar after 7, 28 and 90 days were studied.

Key-words: Activation method, slag, lime, cement, mortar, mechanical behavior.

تأثير عملية تنشيط الإسمنت ذات الإضافات المعدنية بواسطة الجير الناعم على المقاومة الميكانيكية للمونة

:_____

إن عملية إستعمال الإضافات البوزولانية توفر تكلفة أقل و ديمومة جيدة مع وجود خواص بطيئة خلال مرحلة الشك و التصلد. الهدف الرئيسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تأثير المنشط المعدني (الجير المطفيء أو المبلل) على الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للإسمنت الحديدي (تفاعل بطيء) و كذلك المقاومة الميكانيكية للمونة (مقاومة الضغط و الإنحناء). إن عملية التنشيط للإسمنت الحديدي بإستعمال الجير المطفيء تنشط مرحلة الإماهة و تغير في أبعاد الحبيبات خلال المراحل الأولية للشك و التصلد. خلال هذه الدراسة تم الإعتماد على مادة منشطة لزمان الشك (جير بطيء) بنسب متفاوتة (0 ، 2 ، 4 ، 6 ، 8 و 10 نسبة مئوية) بطرق متنوعة (طريقة الإستبدال و الإضافة) مقارنة بوزن الإسمنت الحديدي. إن الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للإسمنت الحديدي المنشط في الحالة الجافة و المبللة (التركيب الكيميائي ، الوزن النوعي ، النعومة ، التوزيع الحبيبي ، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية و زمن الشك) و كذلك مميزات المونة ، منها التقلص ، الإنتفاخ و المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط و الإنحناء) تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي.

مفاتيح : طريقة التنشيط ، الخبث ، الجير ، الإسمنت ، المونة و المقاومة الميكانيكية.

SOMMAIRE

I. ABSTRACT.....	I
II. RESUME.....	II
III. ملخص	III
INTRODUCTION	1

PREMIER CHAPITRE SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. LE CIMENT PORTLAND	4
I.1.1. HISTORIQUE	4
I.1.2. FABRICATION DU CIMENT	4
I.1.3. MATIERE PREMIERE.....	5
I.1.3.1. Composants principaux.....	5
I.1.3.2. Composants secondaires	6
I.1.4. PREPARATION DU CRU.....	8
I.1.5. CUISSON ou CALCINATION	10
I.1.6. BROYAGE DU CIMENT.....	12
I.1.7. LE CLINKER	15
I.1.7.1. Composition chimique du clinker	15
I.1.7.2. Les Principaux minéraux du Clinker	16
I.1.7.3. Calcul de la composition minéralogique du clinker	17
I.1.7.4. Les Modules	18
I.1.8. HYDRATATION	21
I.1.8.1. Réactions d'hydratation	21
I.1.8.2. Mécanisme de prise et du durcissement	22
I.1.8.3. Cinétique et chaleur d'hydratation	23
I.1.8.4. Facteurs influents sur la cinétique d'hydratation	25
I.1.8.5. La réactivité hydraulique des différents constituants.....	26
I.1.8.6. Les hydrates nature et morphologie.....	27
I.1.8.6.1. L'hydroxyde de calcium	27
I.1.8.6.2. L'Ettringite (AFt) et le monosulfate (AFm)	27
I.1.8.6.3. Le gel CSH	28
I.1.9. PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT PORTLAND	29
I.1.9.1. La résistance mécanique	29
I.1.9.2. La consistance normale.....	30
I.1.9.3. La prise du ciment.....	30
I.1.9.4. L'uniformité de la variation volumique	30
I.1.9.5. La chaleur d'hydratation	31
I.1.9.6. Le retrait et le gonflement.....	31
I.2. LES AJOUTS CIMENTAIRES.....	32
I.2.1. GEBERALITES.....	32
I.2.2. CLASSIFICATION DES AJOUTS	32
I.2.3. BENEFICES DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX.....	33
I.2.4. LES DIFFERENTS TYPES D'AJOUTS.....	34
I.2.4.1. Les cendres volantes (V)	34
I.2.4.1.1. Les cendres volantes de classe F	36
I.2.4.1.2. Les cendres volantes de classe C.....	36
I.2.4.1.3. Effet des cendres volantes	36
I.2.4.2. Le laitier de haut fourneau	37

SOMMAIRE

1.2.4.2.2. Types de laitier	37
1.2.4.2.3. Caractéristiques des laitiers	38
1.2.4.2.4. Composition chimique.....	38
1.2.4.2.5. Composition minéralogique	39
1.2.4.3. Les fumées de silice	40
1.2.4.3.1. Effet de la fumée de silice	42
1.2.4.4. La pouzzolane	43
1.2.4.4.1. Définition.....	43
1.2.4.4.2. Type de pouzzolane	43
1.2.4.4.3. Effet de La pouzzolane	44
1.2.4.5. Les Fillers.....	45
1.2.4.5.1. Définition.....	45
1.2.4.5.2. Effet des fillers	45
1.2.4.6. le Gypse.....	45
1.2.5. EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIETES DES BETONS	46
1.2.5.1. Amélioration de l'ouvrabilité	46
1.2.5.2. Chaleur d'hydratation	46
1.2.5.3. Durabilité	47
1.2.5.4. Développement des résistances.....	47
1.2.5.5. Développement des bétons à haute résistance	47
I.3. LES CIMENTS AVEC AJOUTS	48
I.3.1. DEFINITION D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL	48
I.3.2. LE COMPORTEMENT D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL	48
I.3.3. CHIMIE D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND AVEC AJOUT.....	49
I.3.3.1. Définition	49
I.3.3.2. Hydratation et réaction pouzzolanique	49
I.3.3.3. Hydratation du laitier	50
I.3.3.4. Chaleur d'hydratation du laitier	51
I.3.3.5. Influence de la finesse sur l'activité du laitier	51
I.3.4. CLASSIFICATION DES CIMENTS.....	52
I.3.4.1. D'après leur composition.....	52
I.3.4.2. En fonction de leur résistance normale	52
I.4. LA CHAUX.....	54
I.4.1. HISTORIQUE	54
I.4.2. MATIERE PREMIERE.....	54
I.4.3. FABRICATION DE LA CHAUX	56
I.4.3.1. La préparation du calcaire.....	56
I.4.3.2. La cuisson	56
I.4.3.3. L'hydratation (L'extinction)	58
I.4.4. LE CYCLE DE LA CHAUX	58
I.4.5. TYPE DE CHAUX.....	60
I.4.5.1. Les chaux aériennes	60
I.4.5.2. Les chaux magnésiennes.....	60
I.4.5.3. La chaux hydraulique.....	60
I.4.5.4. Familles de chaux.....	61
I.4.6. CARACTERISTIQUES	61
I.4.6.1. Les chaux aériennes	61
I.4.6.2. Les chaux magnésiennes	62
I.4.6.3. Les chaux hydrauliques.....	62
I.4.7. PROPRIETES PHYSICOCHEMIQUES	63

SOMMAIRE

I.4.7.1. Composition chimique	63
I.4.7.2. Propriétés chimiques	64
I.4.7.3. Propriétés physiques	65
I.4.8. LA CHAUX ET LE CIMENT	67
I.4.9. LES NORMES	68
I.4.10. L'UTILISATION DE LA CHAUX	69
I.4.10.1. La chaux en agriculture	69
I.4.10.2. Pour l'amélioration et la stabilisation des sols.....	69
I.4.10.3. La chaux pour le bâtiment.....	69
I.4.10.4. La chaux dans l'industrie.....	70
I.4.10.5. La chaux et l'environnement	70
I.5. METHODES D'ACTIVATION DU CIMENT AVEC AJOUT MINERAL	71
I.5.1. BUT	71
I.5.2. DIFFERENTES METHODES D'ACTIVATION	71
I.5.2.1. Activation chimique	71
I.5.2.2. Activation thermique.....	71
I.5.2.3. Activation mécanique	72

DEUSIEME CHAPITRE METHODES D'ESSAIS

II.1. PROCEDURE EXPERIMENTALE	74
II.1.1. Préparation des ciments étudiés	74
II.1.2. Les essais réalisés.....	75
II.2. METHODES D'ESSAIS ET NORMES	76
II.3. METHODES D'ESSAIS ET LIEUX DE REALISATION	77
II.4. DESCRIPTION ET MODE OPERATOIRE DES ESSAIS.....	78
II.4.1. ESSAIS SUR CIMENTS	78
II.4.1.1. Ciments anhydres	78
II.4.1.1.1. Masse volumique absolue	78
II.4.1.1.2. Mesure de la finesse	79
II.4.1.2. Pâtes de Ciment	82
II.4.1.2.1. Mesure de la consistance de la pâte	82
II.4.1.2.2. Mesure des temps de début et fin de prise	84
II.4.1.2.3. Granulométrie a laser	86
II.4.2. ESSAIS SUR SABLE	88
II.4.2.1. Analyse granulométrique par voie sèche	88
II.4.2.2. Détermination de la masse volumique absolue	90
II.4.2.3. Mesure la propreté du sable	92
II.4.3. ESSAIS SUR MORTIER.....	93
II.4.3.1. Mesure des résistances à la compression et à la traction	93
II.4.3.2. Mesure du retrait et du gonflement.....	98

TROISIEME CHAPITRE CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1. LA CHAUX	101
III.1.1. Constituants	101
III.1.2. Classification	101
III.1.3. Composition chimique	101

SOMMAIRE

III.1.4. Caractéristiques physiques.....	101
III.2. LE CIMENT.....	102
III.2.1. Classification	102
III.2.2. Constituants	102
III.2.3. Composition chimique.....	102
III.2.4. Caractéristiques physiques.....	103
III.3. LE SABLE	104
III.3.1. Composition chimique.....	104
III.3.2. Caractéristiques physiques.....	104
III.3.3. Analyse granulométrique.....	105
III.4. L'EAU DE GACHAGE.....	106

QUATRIEME CHAPITRE RESULTATS ET INTERPRETATION

IV.1. ESSAIS REALISES	108
IV.2. RESULTATS OBTENUS.....	108
IV.2.1. Composition chimique	108
IV.2.2. La masse volumique absolue.....	109
IV.2.3. La consistance normale	110
IV.2.4. Le temps de prise (début)	111
IV.2.5. Le temps de prise (fin)	112
IV.2.6. La surface spécifique Blaine.....	113
IV.2.7. La granulométrie à laser	114
IV.2.8. La Resistance à la compression.....	116
IV.2.9. La Resistance à la Flexion.....	117
IV.2.10. Le retrait	118
IV.2.11. Le gonflement.....	119
IV.3. INTERPRETATION DES RESULTATS	120
IV.3.1. Influence de l'activant sur le poids spécifique et la surface spécifique	120
IV.3.2. Influence de l'activant sur la consistance et les délais de prise	120
IV.3.3. Influence de l'activant sur la distribution granulométrique de ciments.....	121
IV.3.4. Influence de l'activant sur le retrait et le gonflement.....	121
IV.3.5. Influence de l'activant sur les resistances à la compression et à la Flexion.....	122

CINQUIEME CHAPITRE CONCLUSION

V.1. CONCLUSION GANARALE	124
V.2. PERSPECTIVES.....	125
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	127

INDEXE

I. Indexe des tableaux	135
II. Indexe des figures.....	137
III. Indexe des photos.....	138

INTRODUCTION

1. CONTEXTE

Ces dernières années, l'industrie de fabrication des liants hydrauliques (ciments) a été transformée par l'arrivée de nouveaux déchets minéraux (ajouts cimentaires) tels que, les fumées de silice, les cendres volantes et les laitiers de haut fourneau. Les fumées de silice sont des particules très fines ayant une forte teneur en silice amorphe, provenant de la réduction du quartz de grande pureté (silice) par du charbon dans des fours à arc électrique. Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes (résidus) obtenues lors de la combustion du charbon pulvérisé et utilisé dans les centrales thermiques. Les laitiers de haut fourneau sont des sous produits obtenus lors de l'élaboration de la fonte. Ces ajouts minéraux ont des propriétés hydrauliques (formation des composés hydratés stables par réaction avec l'eau) et pouzzolaniques (formation des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau à température ordinaire par combinaison avec la chaux et en présence d'eau) intéressantes.

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout (C.P.A-C.E.M I). Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M 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) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

La chaux est obtenue par la décarbonatation du calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3) à partir de 900 °C. La chaux aérienne peut se présenter sous différentes formes : roche ou poudre pour la chaux vive, poudre, suspension dans l'eau (lait de chaux) ou pâte pour la chaux hydratée. Selon la teneur en argile des calcaires, on obtient différents types de chaux : la chaux grasse et les chaux hydrauliques. La chaux est employée dans différents secteurs grâce à ses nombreuses propriétés physico-chimiques (basicité, surface spécifique, réactivité, etc.). La chaux est principalement employée dans la construction (mortier de maçonnerie), pour le traitement des eaux de consommation, industrielles ou usées, traitement des sols (stabilisation), etc.

L'activation du ciment au laitier par la chaux fine (hydroxyde de chaux) est une méthode simple et économique. Elle est particulièrement bénéfique pour le ciment contenant un ajout pouzzolanique moins réactif (laitier : faible réactivité). La chaux hydratée (agent d'activation de prise) joue trois principaux rôles :

- hydratation du laitier de fourneau granulé (formation des composés hydratés CSH : Tobermorite)

-
- Maintenir le ciment avec un pH > 12
 - hydratation accélérée du laitier (formation d'Ettringite).

2. OBJECTIFS

Le principal objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de l'activateur minéral (chaux hydratée) sur les propriétés physico-chimiques du ciment au laitier (hydraulicité latente) et le comportement mécanique (résistances à la compression et à la flexion) du mortier testé.

Ce travail présente une analyse expérimentale à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du ciment au laitier et la réponse mécanique du mortier en utilisant un activant d'origine minérale (agent d'activation de prise).

L'intérêt de cette étude expérimentale consiste à rechercher, en utilisant la technique d'activation du ciment au laitier par un activant minéral (chaux fine) les meilleures résistances mécaniques du mortier.

3. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les ajouts minéraux, les ciments aux additions minérales, la chaux et les méthodes d'activation.

Les deux chapitres (deuxième et troisième) sont consacrés à l'expérimentation. Nous présentons dans ces deux parties les méthodes d'essais réalisés ainsi que la caractérisation des matériaux utilisés (ciments activés et non activés, la chaux et le sable).

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

Enfin, **le cinquième chapitre** présente une conclusion générale des principaux résultats dégagés lors de cette étude ainsi que les futures perspectives en terme d'expérimentation pour une meilleure compréhension du phénomène d'activation des ciments aux ajouts pouzzolaniques.

CHAPITRE.I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE



- I.1. Le ciment Portland
- I.2. Les ajouts cimentaires
- I.3. Les ciments avec ajouts
- I.4. La chaux
- I.5. Méthodes d'activation du ciment avec ajout

I.1. LE CIMENT PORTLAND

I.1.1. HISTORIQUE

Le ciment dit « ciment Portland » c'est le matériau du 20e siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écossois "Aspdin" prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.

Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux.

C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants. [1]

I.1.2. FABRICATION DU CIMENT

1. Entreposage des matières premières
2. Broyage
3. Homogénéisation
4. Préchauffage et pré-calcination
5. Four rotatif
6. Entreposage du clinker
7. Additifs (gypse, cendres volantes, etc...)
8. Mouture du ciment
9. Entreposage en vrac et chargement. [14]

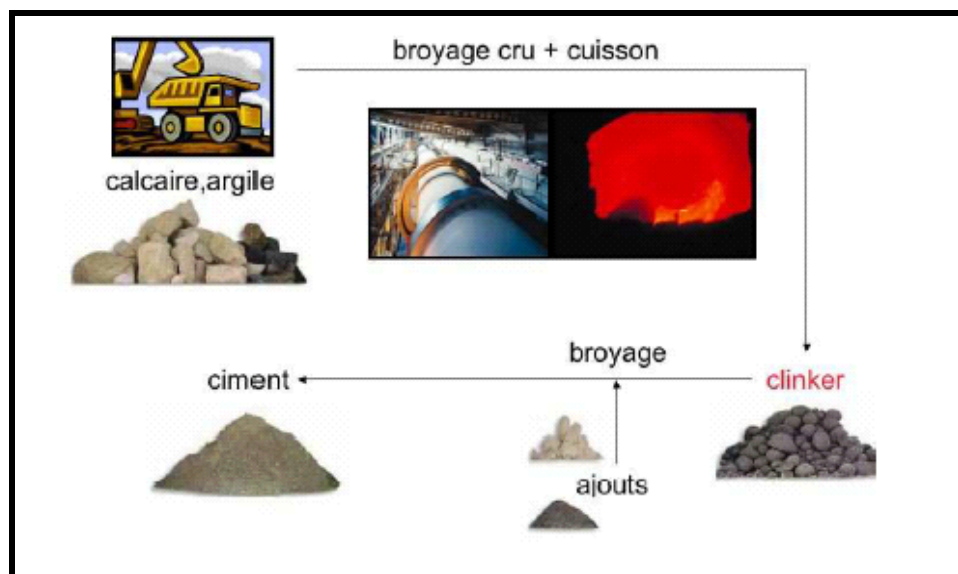


Fig. I.1. Stades de fabrication du ciment. [10]

I.1.3. MATIERE PREMIERE

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 80 % de calcaire et 20 % d'argiles (silicoaluminates).

Ces matières premières sont présentes dans les roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux qui ont une composition proche de 80 % calcaire- 20 % argiles , généralement des correcteurs, minerais de fer qui apporte Fe_2O_3 , bauxite (Al_2O_3), sable (SiO_2) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée. [2]

I.1.3.1. Composants principaux

- **Le calcaire**

Le carbonate de calcium ($CaCO_3$) est très répandu dans la nature. Le calcaire possède une structure microgranulée. Sa dureté varie entre 1,8 et 3,0 dans l'échelle de Mohs et sa densité de 2,6 à 2,8. Plus le calcaire est blanc plus il est pur. Le calcaire renferme souvent des substances argileuses et des composés de fer

- **La marne**

La marne renferme dans sa structure le calcaire, la silice, les substances argileuses et l'oxyde de fer. Sa couleur varie du jaune au gris-noir En fonction des proportions des composés carbonatés et argileux, on peut classer les roches de la manière suivante.

Tab. I.1. classement des roches. [3]

Roches	% $CaCO_3$
Calcaire	96 – 100
Calcaire marneux	90 – 96
Marne calcaire	75 – 90
Marne	40 – 75
Marne argileuse	10 – 40
Argile marneuse	4 – 10
Argile	0 – 4

- **Roches argileuses**

Selon son importance dans la fabrication du ciment Portland, l'argile occupe la deuxième place après le calcaire. Elle est le produit d'altération des alumino-silicates alcalins.

Les argiles se divisent en plusieurs groupes de minéraux.

1. Groupe des Kaolins ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)
2. Groupe de montmorillonites ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$).

3. Groupe des argiles contenant des alcalins ($K_2O.MgO.Al_2O_3.SiO_2.et H_2O$).

- L'illite . $[K_2O,H_2O],3Al_2O_3,6SiO_2$
- La chlorite. $10[Mg, Fe] O, 2Al_2O_3, 6SiO_2, 8H_2O$

Sa densité varie de 2 à 2,2. L'hydroxyde de fer est souvent le composant secondaire de l'argile qui lui donne la coloration. L'argile sans impuretés est blanche.

I.1.3.2. Composants secondaires

Se sont des composants dont la teneur est limitée les normes en vigueur, soit par les données expérimentales

➤ **L'oxyde de Magnésium (MgO)**

Sa teneur est d'environ de 2% et se trouve en liaison avec les phases principales du clinker à l'état libre sous forme de Périclase. Le périclase avec l'eau donne l'hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$, cette réaction est très lente.

➤ **Les Alcalis (Le K_2O et le Na_2O)**

Sont introduits dans le mélange des matières premières avec les argiles et les marnes. Durant la cuisson du ciment dans les fours rotatifs une partie des alcalis se volatilise dans la zone de clinkerisation et apparaît une circulation alcaline

➤ **Le soufre**

Dans la production du ciment, le soufre est présent dans tous les mélanges des matières premières sous forme combinée (ex . FeS_2) et dans les combustibles.

Dans la zone de cuisson, le soufre se transforme en gaz sulfureux (SO_2), qui en réagissant avec les alcalis volatilisés et l'oxygène, forme des vapeurs de sulfate des métaux alcalins.

Les sulfates se condensent dans la zone de préchauffage et retournent dans la zone de cuisson. L'excès de SO_2 dans la zone de préchauffage réagit avec $CaCO_3$ en formant $CaSO_4$. Dans la zone de cuisson $CaSO_4$ se décompose en augmentant la concentration de SO_2 dans les gaz de circulation.

➤ **Les chlorures (Cl)**

Les mélanges des matières premières contiennent souvent de 0,01 à 0,1% de chlorures (Cl) et dans les cas exceptionnels plus de 0,3%. Dans les fours, les chlorures réagissent avec les alcalis en formant les chlorures des métaux alcalins, qui seront transportés par les gaz et viendront se déposer dans la zone de préchauffage, puis il retournent dans la zone de cuisson dans laquelle ils se volatilisent et il se produit une circulation continue entre la zone de cuisson et la zone de préchauffage qui peut causer l'arrêt du four.

Les chlorures provoquent la corrosion de l'acier et présente donc, un danger pour les armatures du béton.

➤ **Les phosphores (P_2O_5)**

La teneur des phosphores dans la plupart des crus est très faible (moins de 0,25% de P_2O_5). Une teneur en P_2O_5 dépassant 0,5% peut provoquer la diminution de la résistance initiale du ciment. . [19]

Tab I.2. Les impuretés nuisibles les plus rencontrées sont. [2]

MgO . oxyde de magnésium	K_2O et Na_2O . alcalis
SO_3 . soufre	Mn_2O_3 . oxyde de manganèse
P_2O_5 . oxyde phosphorique	TiO_2 . oxyde de titane
SrO . oxyde de strontium	Cl^- . ion chlore
F^- . ion fluor	Cr_2O_3 . oxyde de chrome.

Tab. I.3. Influence Des Eléments mineurs sur le ciment. [4]

Eléments mineurs	Concentration dans le ciment	Influence
Magnésium	0.5 – 1.2%	Expansion, si > 5%
Sulfates	0.2 – 0.6%	développement des résistances et évolution de la prise
Alcalins	0.05 – 0.2%	Résistances aux jeunes âges
Phosphates	0.02 – 0.05%	Retard dans la prise, si > 1%
Manganèse	1.0 – 3.0%	Teinte du ciment
Chlorures	3.0 – 4.0%	Corrosion, si > 0.1%, et évolution de la pris

➤ **Les ajouts**

- ✓ les matériaux correctifs, qui sont ajoutés au cru pour ajuster les teneurs en certains oxydes comme SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3
- ✓ les régulateurs de prises du ciment ;
- ✓ les minéralisateurs ;
- ✓ d'autres ajouts comme les fluidifiants et les entraîneurs d'air.

Les matériaux correctifs

- les correctifs siliceux. le sable et le grès ;
- les correctifs alumineux. bauxite,...
- les correctifs ferrugineux. minerai de fer, pyrite grillée,...

Les minéralisateurs

L'activation chimique du processus de cuisson se réalise grâce à des minéralisateurs accélérateurs.

- accélération de la décomposition du CaCO_3
- accélération des réactions à l'état solide par action sur le réseau cristallin
- diminution de la température de formation du clinker fondu
- augmentation de la quantité de la phase fondue
- augmentation des coefficients de diffusion et diminution de la viscosité de la phase liquide.

On peut résumer l'effet résultant de l'emploi des minéralisateurs dans .

- l'augmentation du débit en clinker
- l'économie de l'énergie
- l'amélioration de la qualité. [3]

I.1.4. PREPARATION DU CRU

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Les matières premières sont finement broyées(0,1mm)afin d'obtenir le "cru"

Tab. I.4. La composition chimique du Ciment "cru". [5]

Elet	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Mn_2O	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O K_2O	SO_3	P_2O_5
%	16-26	4 - 8	2 - 5	0 - 3	0-0,5	58-67	1-5	0-1	0,1-0,5	0-1,5

- ✓ C = chaux (CaO) → basique
- ✓ S = silice (SiO_2) → acide
- ✓ A = alumine (Al_2O_3) → acide
- ✓ F = oxyde de fer (Fe_2O_3) → acide
- ✓ Magnésie (MgO) → basique

IL existe 4 méthodes de fabrication du ciment. [13]

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

Broyage pour procédés en voie sèche et semi-sèche

Les matières premières, dans des proportions soigneusement contrôlées, sont broyées et homogénéisées de façon à former un mélange de composition chimique requise. Dans la voie sèche et semi-sèche, elles sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur. Un four auxiliaire peut être nécessaire pour fournir le complément de chaleur nécessaire si les matières premières contiennent une forte proportion d'humidité et pour le démarrage du four.

Broyage préparées en voie humide ou semi-humide

Le broyage humide est réservé aux matières premières préparées en voie humide ou semi-humide. Leurs composants sont broyés avec de l'eau pour former une pâte. Pour obtenir le degré de finesse requis et satisfaire les critères de qualité actuels, les industriels privilégient l'utilisation d'installations de broyage en circuit fermé. Normalement, la voie humide est réservée à la préparation des matières premières contenant plus de 20 % d'eau en masse. Les matériaux comme la craie, les marnes ou l'argile qui sont collants et contiennent naturellement beaucoup d'eau sont mous et peuvent au premier stade de leur préparation, être broyés avec de l'eau. Le mélange est envoyé dans un délayeur où il est déchiqueté et écrasé par des herses rotatives ce qui le transforme en une pâte. Quand celle-ci est suffisamment fine, elle passe dans des tamis montés dans la paroi du broyeur puis elle est pompée et stockée dans des cuves. Il faut souvent la broyer une nouvelle fois pour obtenir une granulométrie satisfaisante, en particulier si on lui ajoute une autre matière première comme le sable.

Pour réduire la consommation de combustibles dans le four, l'addition d'eau au cours du broyage des matières premières est contrôlée et réduite au minimum nécessaire pour que la pâte ait la fluidité voulue et qu'elle réponde aux critères de pompabilité requis (32 à 40 % d'eau en masse). L'utilisation d'additifs chimiques peut permettre de la fluidifier et de réduire sa teneur en eau.

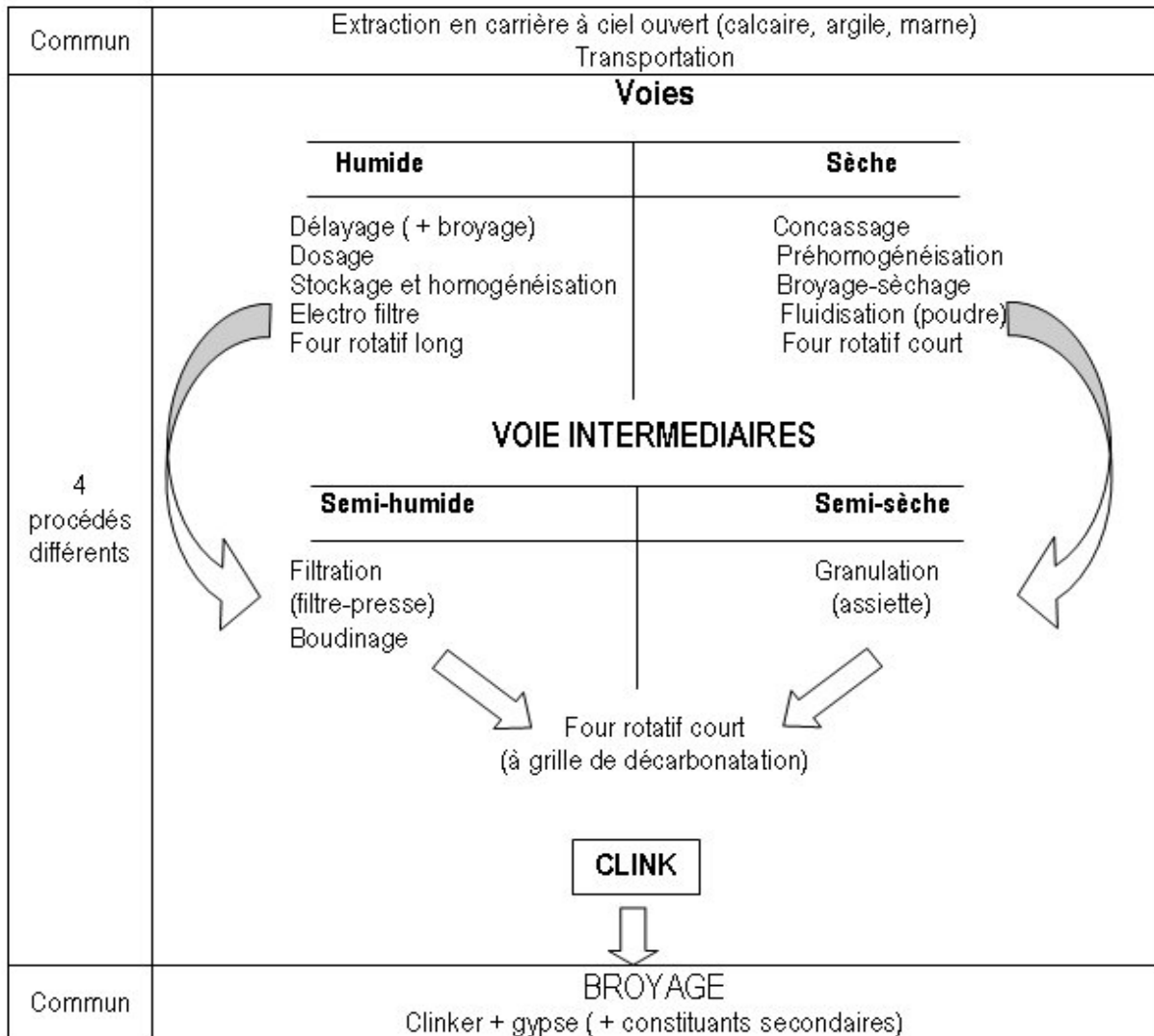


Fig. I.2. Le Schéma de la fabrication du ciment. [5]

I.1.5.CUISSON ou CALCINATION

➤ **Cheminement dans le four**

- ❖ Déshydratation. séchage (100 à 500°)
- ❖ Décarbonatation. calcination (800 à 1100°)
- ❖ Clinkérisation . fusion partielle (1200 à 1500°). [15]

➤ **Phases de formation des Constituants du clinker. [1]**

❖	3 CaO + SiO ₂	-----1220 °C	→ 3 CaO,SiO ₂	C ₃ S . Alite
❖	2 CaO + SiO ₂	-----1220 °C	→ 2 CaO,SiO ₂	C ₂ S . Bélite
❖	3 CaO + Al ₂ O ₃	-----1450 °C	→ 3 CaO,Al ₂ O ₃	C ₃ A . Céliste
❖	4 CaO + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	-----1450 °C	→ 4 CaO,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃	C ₄ AF. Féliste

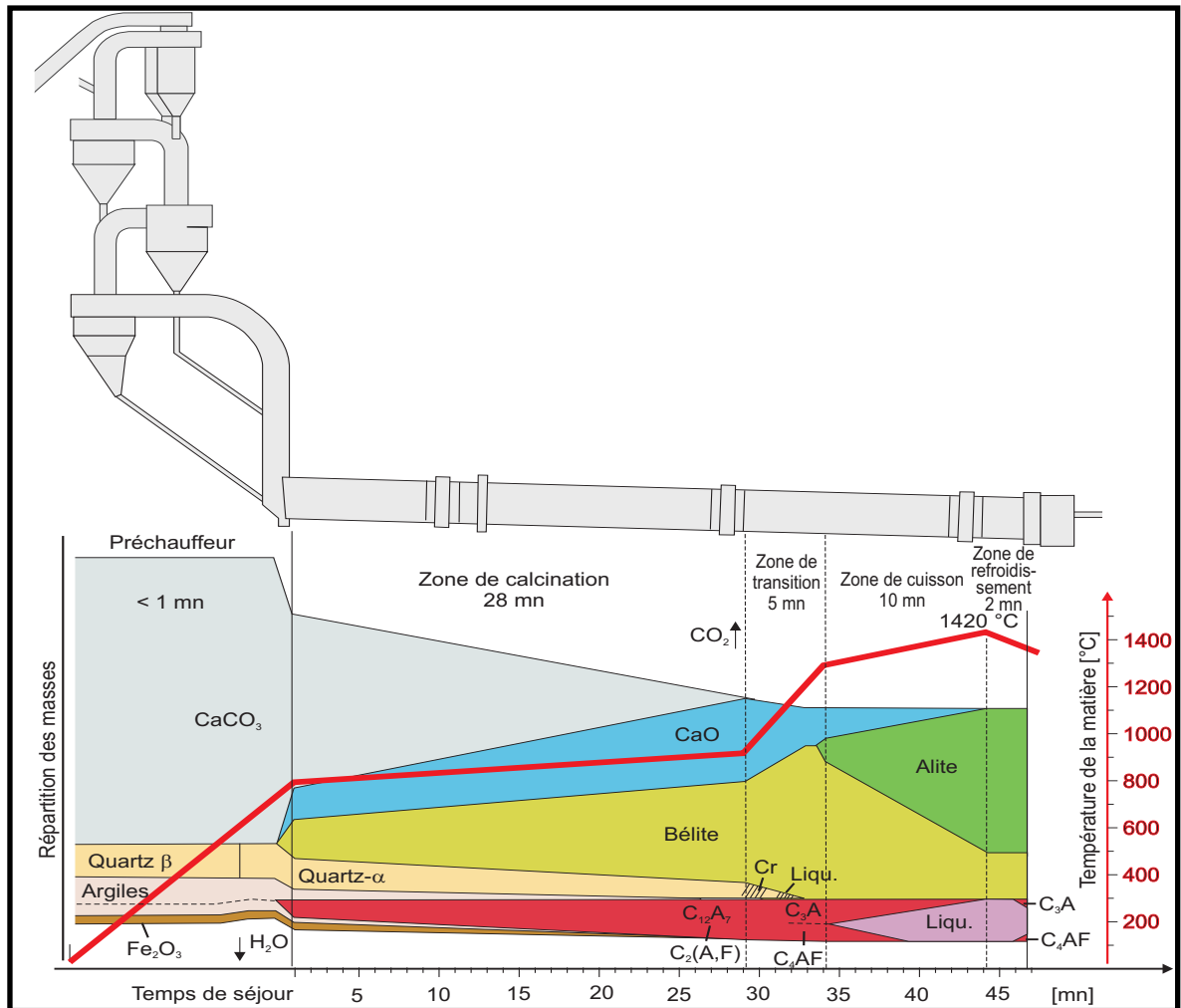


Fig. I.3. Cheminement dans le four. [6]

Quelque soit la technique élaborée pour la préparation du cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties . Un échangeur de chaleur comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie.

Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination). La poudre est ainsi portée d'environ 80 à 1000 °C en un temps très court. Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C).

Il s'agit dans la deuxième partie, d'un four horizontal cylindrique en tôle d'acier avec revêtement réfractaire intérieur de 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour /minute.

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

Tab I.5. Enthalpie des réactions de formation et de décomposition. [1]

Composé	Réactions	ΔH (cal/g)
Monmorillonite	Déshydratation	+ 186
MgCO ₃	MgCO ₃ ⇌ MgO + CO ₂	+ 333
CaCO ₃	CaCO ₃ ⇌ CaO + CO ₂	+ 425
α -CS	CaO + SiO ₂ ⇌ α-CaO. SiO ₂	- 173
β -CS	CaO + SiO ₂ ⇌ β -CaO. SiO ₂	- 183
C ₃ S ₂	3 CaO + 2 SiO ₂ ⇌ 3 CaO. 2 SiO ₂	- 164
β -C ₂ S	2 CaO + SiO ₂ ⇌ 2 CaO. SiO ₂	- 175
C ₃ S	3 CaO + SiO ₂ ⇌ 3 CaO. SiO ₂	- 118
C ₃ S	2 CaO. SiO ₂ + CaO ⇌ 3 CaO. SiO ₂	+ 8
CA	CaO + α Al ₂ O ₃ ⇌ CaO. Al ₂ O ₃	- 26
C ₁₂ A ₇	12 CaO + 7 α Al ₂ O ₃ ⇌ 12CaO. 7Al ₂ O ₃	- 10
C ₃ A	3 CaO + α Al ₂ O ₃ ⇌ 3 CaO. Al ₂ O ₃	+ 18
CA ₂	CaO + 2 α Al ₂ O ₃ ⇌ CaO. 2Al ₂ O ₃	- 16
C ₂ F	2 CaO + α Fe ₂ O ₃ ⇌ 2 CaO. Fe ₂ O ₃	- 27
C ₄ AF	4 CaO + α Al ₂ O ₃ + α Fe ₂ O ₃ ⇌ 4CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	- 16
Bain de fusion	54,8% CaO, 22,7% Al ₂ O ₃ , 16,5% Fe ₂ O ₃ , 6% SiO ₂	+ 97

I.1.6. BROYAGE DU CIMENT

Le ciment est véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise.

Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tel que le laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment. [1]

Compte tenu de la diversité des types de ciment demandés par le marché, les stations de broyage de la dernière génération équipées d'un séparateur aéroulique dynamique sont les plus répandues.

Les installations de broyage les plus courantes sont les suivantes.

- le tube broyeur en circuit fermé (additions minérales relativement limitées, sauf si elles sont pré-séchées ou sèches),
- le broyeur vertical à galets (bien adapté aux additions minérales importantes du fait de sa capacité de séchage ainsi qu'au broyage séparé des additions minérales),
- la presse à rouleaux (additions minérales relativement limitées, si non sèches ou pré-séchées).

Parmi les autres systèmes de finissage, on peut citer .

- le tube broyeur à sortie en bout, en circuit ouvert,
- le tube broyeur à sortie en bout, en circuit fermé avec séparateur aéraulique mécanique ou séparateur à cyclones (plus anciens),
- le broyeur horizontal à rouleaux. [68]

Tab. I.6. Les principaux minéraux que renferme le ciment portland. [1]

Minéraux	Formule chimique	Symbole	Rôle
Silicates tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	Résistance initiale
Silicates bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	Résistance long terme
Aluminates tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Prise rapide
Alumino-ferrite tetracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Sans effet sur la résistance du ciment
Alumino-ferrite calcique	$2\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2(\text{A.F})$	
Chaux libre	CaO	C	
Oxyde de magnésium libre	MgO	M	
Sulfates de métaux alcalins	$(\text{K.Na})_2\text{SO}_4$	--	
Sulfates de calcium	CaSO_4	--	

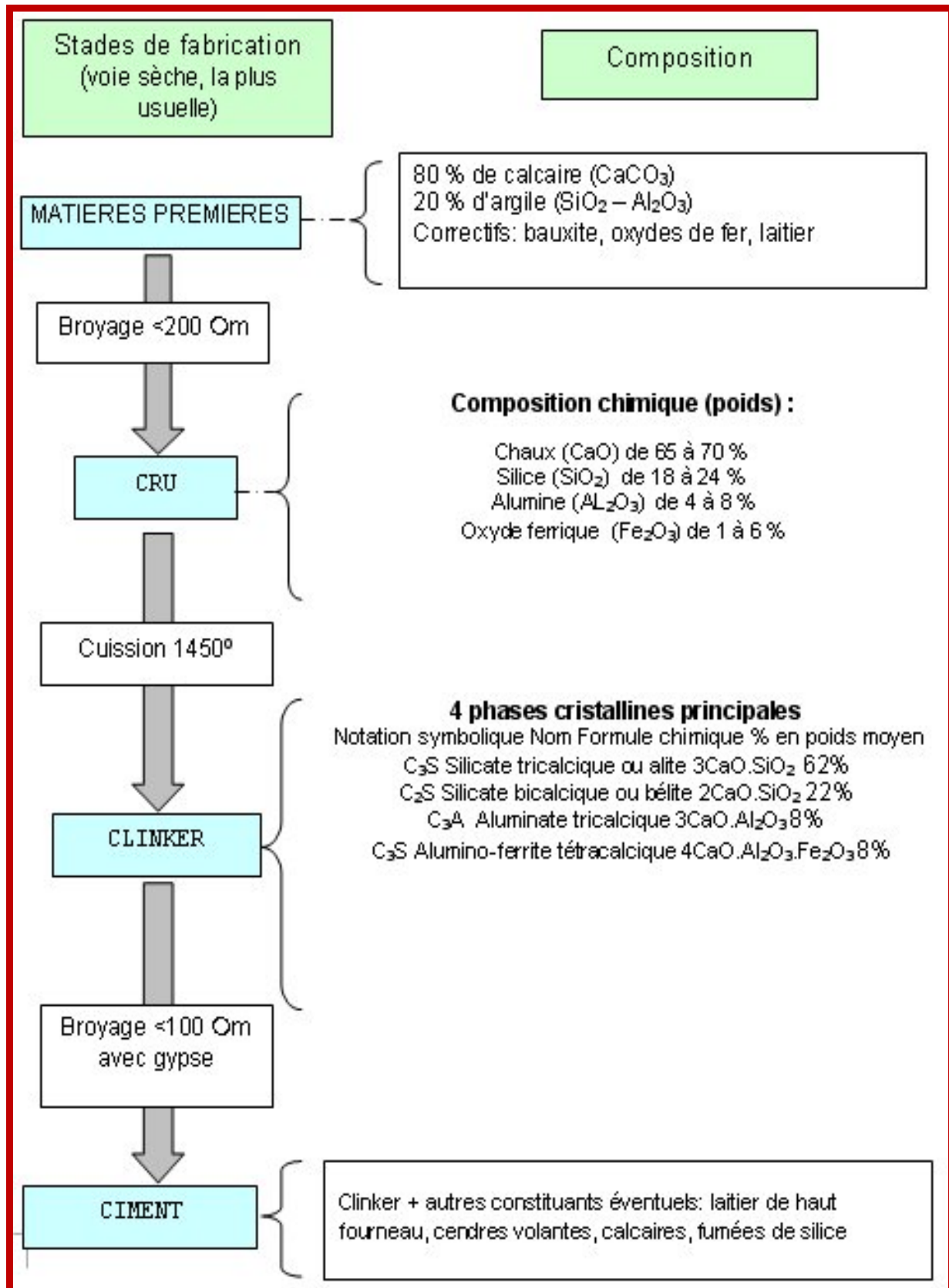


Fig. I.4. Processus de fabrication du ciment. [5]

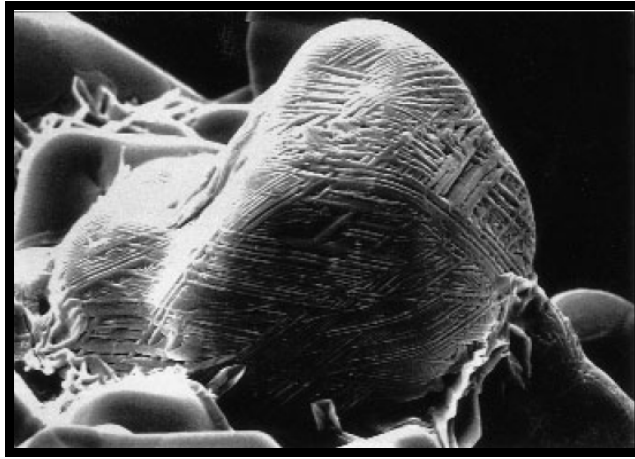
I.1.7. LE CLINKER

Fig. I.5. Cristaux anhydres du clinker. [9]

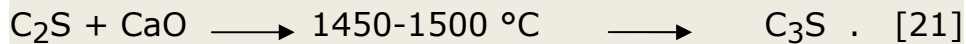
I.1.7.1. Composition chimique du clinker

Tab I.7 . Composition chimique du clinker. [16]

Éléments	Minimum	Maximum
Perte au feu	0.2	1.1
SiO ₂	20.0	24.3
Al ₂ O ₃	3.7	7.1
Fe ₂ O ₃	1.7	5.7
CaO	61.0	68.1
MgO	1.7	4
SO ₃	0.05	1.3
K ₂ O	0.05	1.4
Na ₂ O	0.05	0.7
TiO ₂	0.15	0.4
Mn ₂ O ₃	0.05	1.2
P ₂ O ₅	0.05	0.6
Cl	0.00	0.1
F	0.01	0.3
CaO libre	0.6	2.8
Module silicique	1.8	3.9
Module aluminoferrique	0.7	2.8
Indice de saturation	84.8	100.8

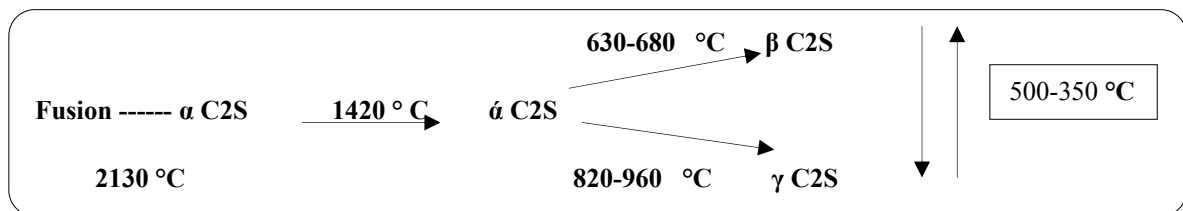
I.1.7.2. Les Principaux minéraux du Clinker. [1]

➤ L'ALITE : C_3S



C'est le minéral le plus important. Il est représenté par le silicate tricalcique C_3S . En réalité, c'est une solution solide contenant des ions étrangers tel que Al, Mg, Fe, Na, K, Cr, Ti, Mn, P etc ...

➤ LA BELITE : La bélite ou C_2S présente au moins 4 formes allotropiques



Dans le clinker industriel, la bélite se trouve sous forme de solution solide renfermant des ions étrangers. Dans les clinkers industriels, elle correspond à une forme β .

À 1420 °C, il y a formation de α - C_2S et aux températures < 1420 °C α - C_2S , qui pendant le refroidissement du KK à 680 °C se transforme en β - C_2S métastable.

Au delà de cette température, le β - C_2S peut se transformer en γ - C_2S .

Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation de volume de 10%, ce qui provoque la pulvérisation du clinker.

Le forme γ est pratiquement inerte en action avec l'eau. [21]

➤ LA CELITE : La célite est la solution solide de l'aluminate tricalcique C_3A

➤ LA FELITE: C_4AF Les alumino-ferrites forment une série de solutions solides $C_2(A.F)$

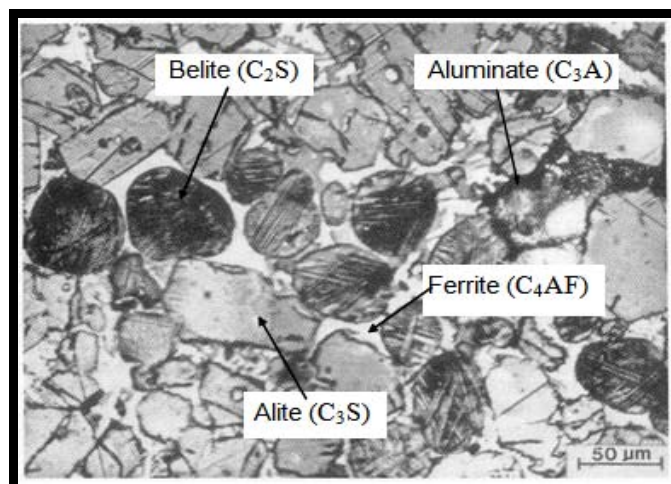


Fig. I.6 . Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie De clinker de ciment Portland (Taylor (1997)).[66]

I.1.7.3. Calcul de la composition minéralogique du clinker

Sur la base de l'analyse chimique, R.H. BOGUE a élaboré une méthode pour le calcul de la composition minéralogique du clinker.

Tab I.8. Calcul de la composition minéralogique du clinker. [1]

oxydes	C ₃ S- (w)	C ₂ S - (x)	C ₃ A- (y)	C ₄ AF -(z)
Minéraux				
CaO (a)	0,7376	0,6512	0,6227	0,4616
SiO₂ (b)	0,2631	0,3488		
Al₂O₃ (c)			0,3773	0,2098
Fe₂O₃ (d)				0,3282

- $a = 0,7369 w + 0,6512 x + 0,6227 y + 0,4616 z$
- $b = 0,2631 w + 0,3488 x$
- $c = 0,3773 y + 0,2098 z$
- $d = 0,3286 z$
- $w = 4,071 a - 7,600 b - 6,718 c - 1,430 d$
- $x = 8,602 b - 5,068 c - 3,071 a + 1,078 d$
- $y = 2,650 c + 1,692 d$
- $z = 3,043 d$

Clinker ordinaire .

- $C_3S = 4,071 CaO - 7,60 SiO_2 - 6,718 Al_2O_3 - 1,430 Fe_2O_3$
- $C_2S = 8,602 SiO_2 - 5,068 Al_2O_3 - 3,071 CaO + 1,078 Fe_2O_3$
- $C_3A = 2,650 Al_2O_3 - 1,692 Fe_2O_3$
- $C_4AF = 3,043. Fe_2O_3 . [23]$

Clinker sans C³A .

- $C_3S = 4.07 x CaO - 7.6 x SiO_2 - 4.48 x Al_2O_3 - 2.86 x Fe_2O_3$
- $C_1S = 2.87 SiO_2 - 0.75 x C_3S$
- $C_4AF = 4.77 x Al_2O_3$
- $C_2F = 1.70 x Fe_2O_3 - 2.67 x Al_2O_3 . [16]$

De nombreux savants ont étudié la chimie du clinker Portland et la composition chimique est maintenant bien connue (tableau I.8). Par contre, la minéralogie du clinker n'a pas encore livré tous ses secrets (tableau I.9). Des travaux de Le Chatelier, Michaelis, Lea et Parker, Rankin et Wright, Köhl, Bogue, ..., il est établi que le clinker est principalement constitué en proportions variables de. [16]

Tab I.9. Composition minéralogique de clinker. [16]

Minéraux		Minimum %	Maximum %
Alite	C ₃ S	45.0	79.7
Bélite	C ₂ S	5.7	29.8
Aluminate	C ₃ A	1.1	14.9
Aluminoferrite	C ₄ AF	2.0	16.5
Périclase	MgO	0	5.8
Chaux libre	CaO	0.6	2.8

I.1.7.4. Les Modules.

➤ **Module hydraulique**

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1,7 - 2,3$$

En général, MH = 2. . [19]

MH < 1,7 → Ciment à résistance faible.

MH > 2,3 → Cuisson difficile, résistance initiale élevée et volume du ciment pas constant.

➤ **Module silicique**

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 2.4 - 4$$

En général, MS = 2,2 à 2,6. . [19]

MS < 2 → Cuisson facile, phase liquide en excès.

Selon le rapport SiO₂/Al₂O₃ qu'on obtient, la viscosité de la phase liquide peut descendre à des valeurs qui permettent au C₄AF d'infiltrer les briques. Le croûtage, quoi qu'excessif, est instable et est lavé. Le clinker est dur, tendance à la formation de boules de linker, four instable et consommation calorifique basse.

MS > 3 → Cuisson difficile en raison de la réduction de la phase liquide, clinker poussiéreux. Le croûtage est instable par sa faible résistance aux

chocs thermiques,, chaux libre élevée, four instable, charge thermique élevée, ciment à résistance élevée et prise lente

➤ **Module Alumino-ferrique. . [19]**

$$\text{MAF} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,5 - 2,5 \text{ . [3]}$$

Le MAF contrôle principalement la viscosité de la phase liquide et la cinétique de formation de C3A jusqu'à 1338°C. ↗ MAF conduit à une ↗ du % de la phase liquide

MAF < 1,5 → Phase liquide fluide et sa densité est élevée favorisant ainsi l'infiltration des réfractaires par des phases étrangères.

C3A faible, la chaux se combine avec Fe2O3 pour former C2F et C4AF.

Le ciment présente une chaleur d'hydratation faible, une résistance initiale faible avec une prise lente.

MAF > 2,5 → Phase liquide importante ce qui rend difficile la formation de C3S, résistance initiale élevée.

En raison de l'↗ du C3A, la chaleur d'hydratation du ciment ↗ et le temps de prise devient court

➤ **Facteur de saturation en chaux. [3]**

$$\text{MgO} \leq 2 \Rightarrow \text{Csc} = \frac{(\text{CaO} + 0,75 \text{ MgO}) \times 100}{2,85 \cdot \text{SiO}_2 + 1,18 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{MgO} > 2 \Rightarrow \text{Csc} = \frac{(\text{CaO} + 1,5 \text{ MgO}) \times 100}{2,85 \cdot \text{SiO}_2 + 1,18 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

En général, le Csc est compris entre 90 et 98.

F.S.C. > 98 → La possibilité de cuisson est réduite, la CaO_L est élevée ainsi que celle du C3S et les résistances initiales.

F.S.C. < 98 → Le cru est facile à cuire donc consommation calorifique faible, la chaux libre reste faible.

QUELQUES PARAMETRES. [3]

➤ **% de la phase liquide dans la zone de cuisson**

La PL favorise la formation de C3S. a 1450 °C, PL = 25.

La tenue des réfractaires dans la zone de cuisson n'est pas seulement affectée par le % PL, mais aussi par sa viscosité.

Al₂O₃, K₂O et Na₂O augmentent cette viscosité.

Fe₂O₃ et SO₃ diminuent la viscosité de PL.

La tenue des réfractaires dans la zone de cuisson n'est pas seulement affectée par le % PL, mais aussi par sa viscosité.

Al₂O₃, K₂O et Na₂O augmentent cette viscosité.

Fe₂O₃ et SO₃ diminuent la viscosité de PL.

MAF > 1,38 -----PL (1338 °C) = 6,1 F + M + K + SO₃

MAF < 1,38 -----PL (1338 °C) = 8,2 A + 5,22 F + M + N + K + SO₃

En général, PL varie de 23 à 28%.

PL < 20% → Four instable et KK poussiéreux, il y a tendance à la formation d'anneaux dans la zone de transition, la formation de croûtage devient difficile.

PL > 30% → L'excès de phase liquide attaque sévèrement les réfractaires. La charge de matière semi fondue glisse sur le croûtage et le détruit dans la zone où se trouve la flamme.

Le C₃S formé peut se décomposer, car la vitesse de refroidissement devient plus lente diminuant ainsi la résistance du ciment.

➤ **Température minimale de cuisson**

$$T^{\circ}\text{C} = 1300 + 4,51 \text{ C}_{3\text{S}} - 3,74 \text{ C}_{3\text{A}} - 12,64 \text{ C}_{4\text{AF}}$$

➤ **Indice d'aptitude à la cuisson**

$$\text{I.A.C} = \frac{\text{C}_{3\text{S}}}{\text{C}_{3\text{A}} + \text{C}_{4\text{AF}}} = 2,6 - 4,5$$

➤ **Coefficient de stabilité de croûtage**

$$\text{MAF} > 0,64 \Rightarrow \text{AW} = \text{C}_{3\text{A}} + \text{C}_{4\text{AF}} + 0,2 \text{ C}_{2\text{S}} + 2\text{F}$$

$$\text{MAF} < 0,64 \Rightarrow \text{AW} = \text{C}_{2\text{F}} + \text{C}_{4\text{AF}} + 0,2 \text{ C}_{2\text{S}} + 2\text{F}$$

AW doit être compris entre 27 et 32.

Plus AW est ↗, plus il y a de chances que le croûtage se forme.

Plus la teneur en Fe₂O₃ est ↑, plus le croûtage devient dense et donc fragile aux chocs thermiques

AW < 20 ⇒ Croûtage faible et instable

AW > 35 ⇒ Croûtage facilement érodé et instable

➤ **Charge thermique dans la section transversale du four**

Q . Débit du gaz [Nm³/h

$$C.T.S.T = \frac{Q \cdot PCI}{\pi D^2/4} = \max 3,46 \cdot 10^6 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

PCI . Pouvoir Calorifique inférieur du gaz

➤ **Module de sulfates**

$$M_{SO_3} = \frac{SO_3/80}{K_2O/94 + Na_2O/62 - 2(Cl/35,5)}$$

MSO₃ doit être compris entre 0,83 et 1.

Si le bilan est déséquilibré, on aura des formations de concrétions dans le préchauffeur et formation d'anneau dans la zone de calcination. [3]

I.1.8. HYDRATATION

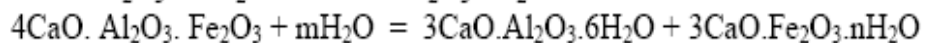
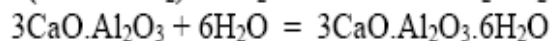
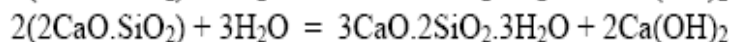
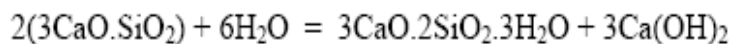
I I.1.8.1. Réactions d'hydratation

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

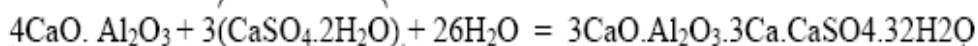


Les 4 principaux constituants anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates et aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau

Principales réactions avec l'eau. [24]



GYPSE



CIMENT PORTLAND

HYDROSULFO-ALUMINATE CALCIQUE

I.1.8.2. Représentation du mécanisme de prise et du durcissement

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

❖ Phase dormante

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

❖ Début et fin de prise

Après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité. C'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ($S = 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les ciments de classe 35 et 45 ont un temps de prise supérieur à 1h30 à $T = 20^\circ\text{C}$. En revanche, les ciments de classe 55 et HP ont un temps de prise supérieur à 1h30 à la même température

❖ Durcissement

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

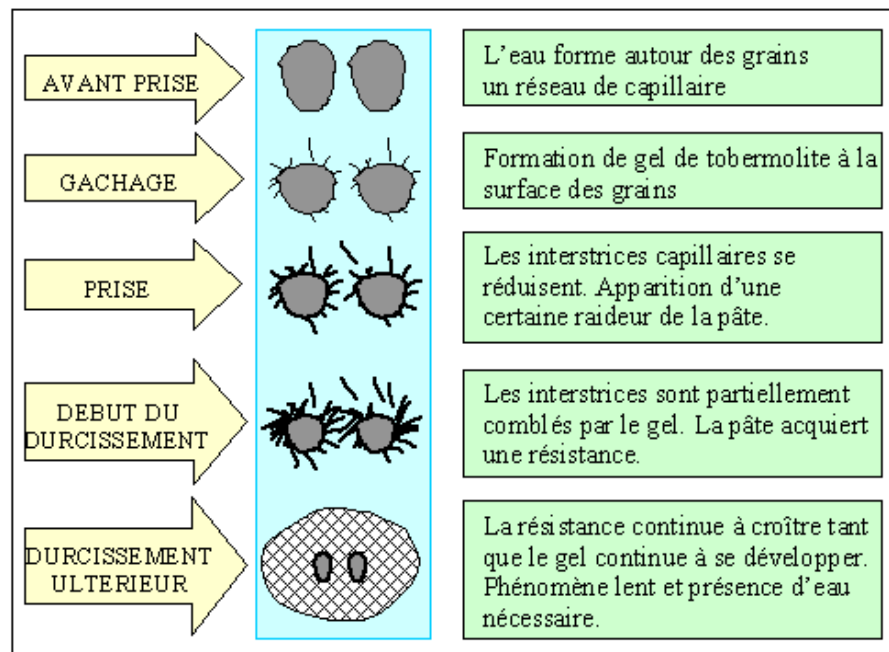


Fig. I.7. Les phases de l'hydratation. [5]

❖ Fausse prise .

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

- Lorsque la réactivité de l'aluminat tricalcique et des sulfates est élevée, la quantité d'étringite formée est tel qu'un raidissement prématuré intervient.
- Lorsque la réactivité des l'aluminat l'emporte sur celle de sulfates, c'est la formation de l'aluminat hydraté ou de mono-sulfo-aluminat de calcium hydraté qui provoque la fausse prise.

Lorsque la solution interstitielle est sursaturée en sulfates (en raison par exemple de la présence accidentelle d'anhydrite dans le ciment), le raidissement est provoqué par la formation de cristaux de gypse .

I.1.8.3. Cinétique et chaleur d'hydratation

Les minéraux du ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes. C3A et C3S s'hydratent plus vite que C4AF et C2S La réaction d'hydratation du ciment portland est exothermique, la quantité de chaleur dégagée par hydratation d'un gramme de ciment portland à 28 jours est de 400 – 500 joules qui se répartissent de la manière suivante, entre les silicates et les aluminates, étudiés séparément.

Le premier signal correspond aux réactions immédiates entre le C3S et l'eau (adsorption des molécules d'eau), le second effet thermique traduit la précipitation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et C-S-H.

Tab.I.10. La chaleur d'hydratation. [1]

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

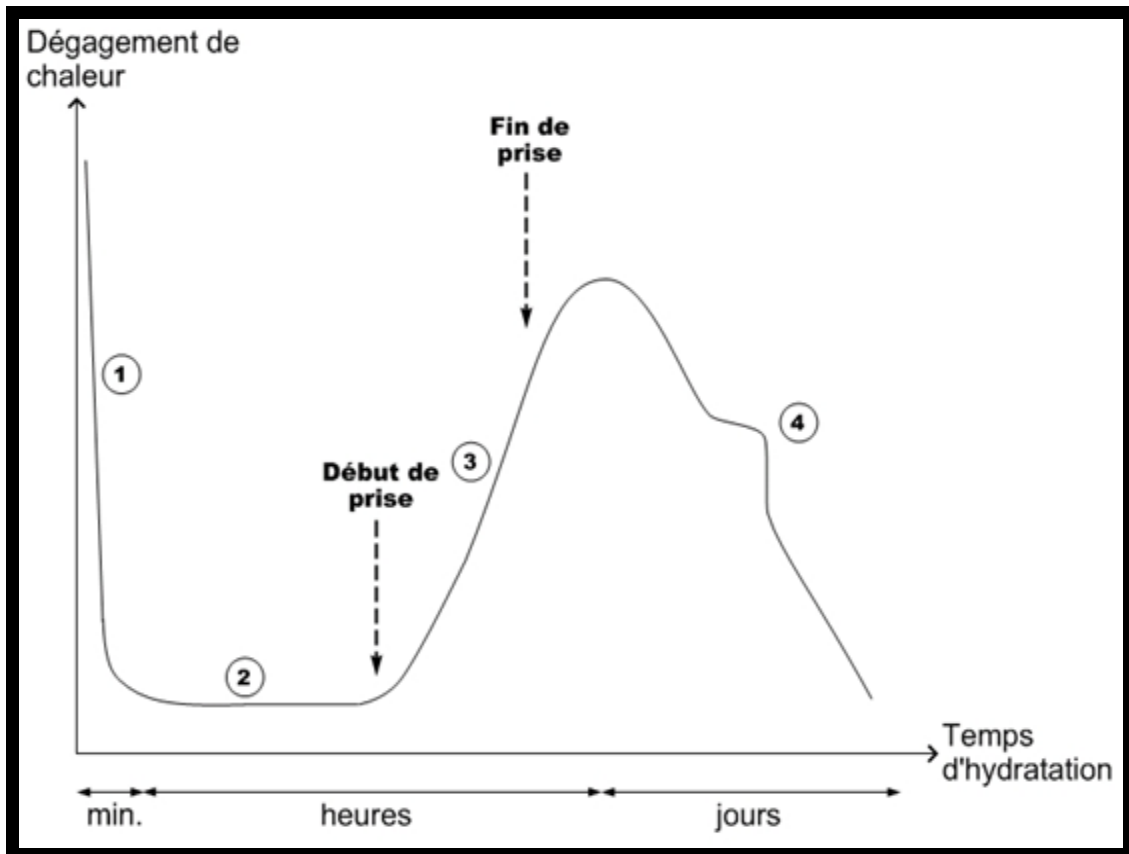


Fig. I.8. Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment. [66]

❖ Période 1. réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables). Cela correspond donc à une phase de dissolution. Les ions entrent en solution.

❖ Période 2. période dormante

Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le pH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Cette période correspond à la phase durant laquelle le béton est maniable.

❖ Période 3. période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de

précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C- S- H). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer permettant alors la création d'un solide rigide. La prise du béton se situe donc dans cette période. Elle correspond au moment où le béton passe de sa phase liquide à sa phase solide, c'est-à-dire qu'un chemin continu de particules liées mécaniquement traverse le solide.

❖ Période 4. période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. Ainsi, cette période se traduit sur la courbe par une diminution de la chaleur dégagée. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. De plus la quantité d'eau au départ doit être suffisante pour hydrater tout le ciment. D'après Van Breugel (2001), la valeur critique est $(E/C)_{crit} \approx 0.4$. C'est aussi durant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm. Cette réaction correspond à la partie bosselée de la courbe de calorimétrie présentée à la Figure 2.3.[66]

I.1.8.4. Facteurs influents sur la cinétique d'hydratation

➤ La classe du ciment

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

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

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

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

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

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

➤ Les sels

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

➤ La température

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

✓ Thermodynamique par ce qu'elle change la nature et la stabilité des hydrates.

- ✓ Cinétique par ce qu'elle accélère ou retarde les réactions chimiques entre l'eau et les constituants anhydres.

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

$$V = A \cdot e^{-E/RT}$$

- V. Vitesse des réactions.
- A. Constante.
- E. Énergie d'activation.
- R. Constante des gaz parfaits.
- T. Température [°K]

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

➤ **Les adjuvants accélérateurs**

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

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

I.1.8.5. La réactivité hydraulique des différents constituants

Il existe des relations entre les structures cristallines et la réactivité hydraulique.

➤ **C3S**

La réactivité du silicate tricalcique est rattachée à.

- ✓ L'irrégularité de ses liaisons Ca-O
- ✓ La présence de sites vacants dans un réseau cristallin

L'accélération de l'hydratation est due à des défauts de structure cristalline (lacunes, désordre de substitution et d'addition).

➤ **C2S**

La forme γ est pratiquement pas hydraulique.

La forme β offre une bonne réactivité.

L'hydratation des formes α et δ n'est connu qu'à travers celle des variétés stabilisées à la température ambiante par des éléments étrangers tels que les alcalins.

Le potassium donne une solution solide α plus réactive que β et le sodium stabilise la forme α plus réactive que β .

➤ **C3A**

La grande réactivité du C3A peut être rattachée à l'irrégularité des liaisons Ca-O et à la présence de sites vacants.

Les variétés cristallines des solutions solides C3A + Na₂O correspondent à des réseaux compacts elles s'hydratent plus lentement que la phase pure.

➤ **C4AF**

Les Aluminoférrites s'hydratent de la même façon que C3A.

Il existe des variations des réactivités entre les différents éléments de la série des solutions solides C₂A_{1-x}.F_x.

I.1.8.6. Les hydrates (Nature et Morphologie)

Les phases cristallines sont.

- ❖ L'hydroxyde de calcium
- ❖ L'ettringite
- ❖ Le monosulfoaluminate de calcium hydraté

Les phases moins cristallisées sont.

- ❖ Le gel de C-S-H
- ❖ Le reste de la phase vitreuse du clinker
- ❖ L'hydroxyde de calcium amorphe

Les proportions (en masse) de chaque phase .

pour une pâte de ciment complètement hydratée sont estimées par S. Diamond à :

- 70% pour le gel de C-S-H,
- 20% pour le CH
- 7% pour l'ettringite et le monosulfate,
- 3% pour le clinker non hydraté et les constituants mineurs. [41]

I.1.8.6.1. L'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂

Les cristaux de formetrigonale.la structure est composée de couches d'octaèdres de Ca(OH)₆ lies entre eux.

I.1.8.6.2. L'Ettringite (AFt) et le monosulfate (AFm).

L'ettringite et le monosulfate sont bien cristallisés. Ils présentent souvent une forme substituée d'Al par Fe et du soufre par C ou Cl.

- **L'Ettringite** . L'ettringite ou sel de Candlot est un trisulfoaluminate de calcium hydraté de formule . **3 CaO. Al₂O₃ . 3CaSO₄. 32H₂O** est de forme trigonale. Sa structure est formée de colonnes de Ca₃Al(OH)₆.12H₂O Parallèles aux ions de sulfateset aux molécules d'eau
- **L'AFm** . est aussi trigonale, mais sa structure est formée de couches de Ca₂Al(OH)₆.2H₂O Séparées par des sites occupés par les ions de sulfateset aux molécules d'eau

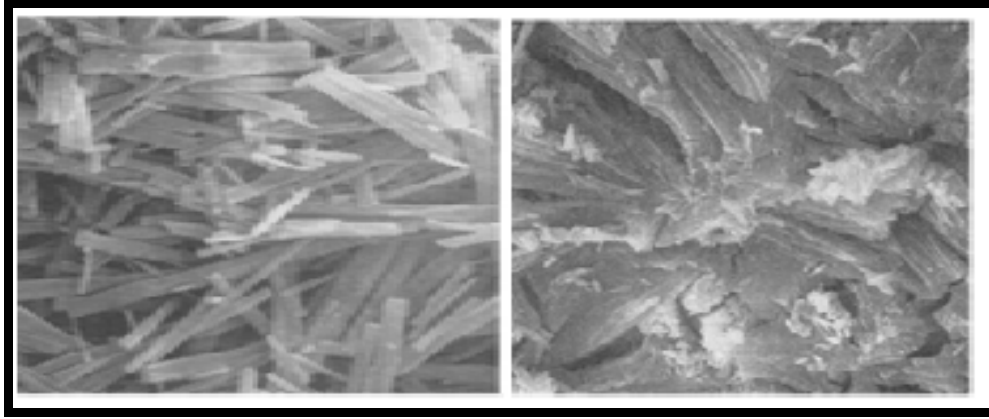


Fig. I.9. Micrographies de l'ettringite, d'après [41].

- (a). Cristaux bien formés d'ettringite non expansive précipités à partir de la solution
- (b). Ettringite massive mal cristallisée expansive formée topochemiquement.

I.1.8.6.3. Le gel de C-S-H

Il est difficile de caractériser la structure du gel de C-S-H à cause de sa composition qui est variable et de son caractère amorphe ou semi-amorphe.

Le type de C-S-H varie en fonction de son origine (C₃S, C₂S) et des conditions d'hydratation (excès d'eau-température-ect.). On distingue 4 types de CSH.

- ❖ **Type I (fibreux).** est formé de particules fibreuses d'une longueur d'environ 0,5 à 2 μm. Ces fibres ne sont pas parallèles, mais elles sont souvent liées ensemble. Ces petites fibres ont tendance à former des branches. Elles sont aussi souvent enroulées sur elles même. Elles présentent une bonne résistance.
- ❖ **Type II (réseau réticulaire).** Dans ce type, plusieurs grains de ciment sont regroupés sous forme de réseau réticulaire. Le C-S-H de type II ne se retrouve que dans les pâtes de ciment (pas dans les pâtes de C₃S).
- ❖ **Type III.** Le troisième type de C-S-H se retrouve dans la pâte de ciment durcie et représente la majorité du C-S-H. Sa morphologie est composée de petites particules irrégulières et plates d'environ 0,3 μm
- ❖ **Type IV.** Plusieurs auteurs reconnaissent qu'une partie du C-S-H est formée dans la zone interne de la couche périphérique d'origine de la particule de ciment. Ce genre de produit interne est désigné comme le C-S-H de type IV. Ce C-S-H présente une surface couverte de fossettes. Il est formé de grains de 0,1 μm. Ce type de C-S-H n'est pas courant dans les pâtes de ciment.

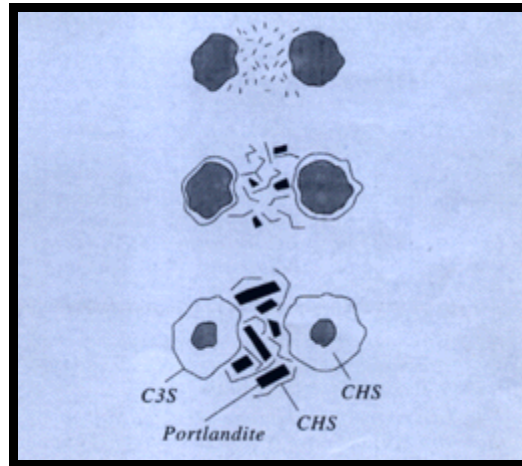
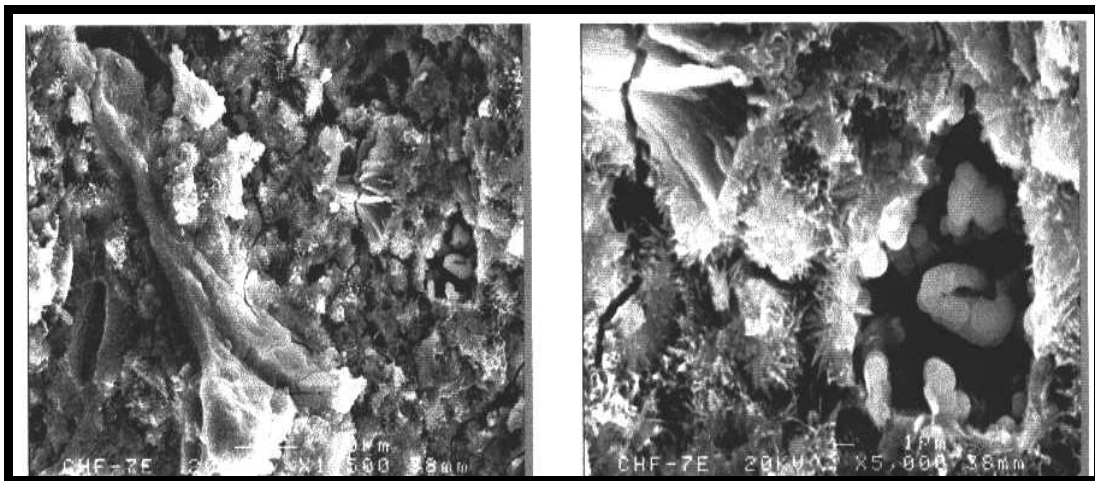


Fig. I.10. Les hydrates. [66]

Fig. I.11. Observations au MEB de la pâte de ciment CHF
Étuvée à 100 °C 7 jours. [67]

I.1.9. PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT PORTLAND

I.1.9.1. La résistance mécanique

L'aluminat tricalcique, en présence des autres minéraux du clinker, favorise la croissance rapide de la résistance pendant les premiers jours de durcissement.

L'alumino-ferrite tétra-calcique se comporte assez activement pendant le durcissement.

On prend la résistance à 28 jours pour unité, la croissance de la résistance d'un ciment portland ordinaire serait de 0,36 à 3 jours, 0,67 à 7 jours, 1,5 à une année et 2,5 à deux ans.

Les facteurs technologiques pour leur part, ont de l'influence sur la résistance mécanique, parmi ces facteurs, on distingue :

✓ Le rapport E/C plus ce rapport est petit, plus la vitesse de croissance ainsi que la résistance finale sont grandes.

✓ La finesse de mouture des ciments qui est un facteur technologique caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée.

A une augmentation de finesse correspond une augmentation des résistances précoces (2 et 7 jours).

On peut noter qu'une croissance de la finesse de mouture entraîne aussi la diminution de l'activité du ciment pendant son stockage.

Les conditions de stockage du ciment sont un des facteurs technologiques qui influent sur l'activité du ciment, puisque H₂O vapeur et CO₂ forment, à la surface des particules, des nouveaux produits diminuant de l'activité du liant.

✓ Ainsi, le stockage d'un ciment à prise rapide pendant un mois entraîne la chute de son activité.

Pour augmenter sa résistance au stockage, on lui ajoute des additions hydrophobes (acide aminique, jusqu'à 0,25%).

I.1.9.2. La consistance normale

La consistance normale caractérise les propriétés rhéologiques des pâtes. Elle consiste à la détermination de la valeur rationnelle de E/C (eau/ciment).

C'est la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention d'une pâte normale. Elle varie de 24 à 28% (rapporté à la masse du ciment).

Cette quantité d'eau dépend de plusieurs facteurs .

- La composition minéralogique.
- La finesse de mouture.
- La présence d'additions etc ...

Cette quantité d'eau augment avec l'augmentation de la finesse de mouture de la teneur en aluminates, des ajouts actifs d'origine sédimentaires.

I.1.9.3. La prise du ciment

C'est l'épaississement et la perte de mobilité de la pâte.

Une des plus importantes propriétés techniques du ciment est sa rapidité de prise. La confection des éléments devient difficile (début de prise) ou impossible (fin de prise).

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

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

I.1.9.4. L'uniformité de la variation volumique

C'est l'indice caractérisant l'intégrité des éléments à base de pâte de ciment.

Ainsi l'expansion non uniforme entraîne la destruction complète des éléments en béton. Les raisons de l'expansion non uniforme sont.

- L'oxyde de calcium fritté en quantité supérieur à 1,5 – 2%.
- L'oxyde de magnésium en quantité supérieures à 5%

Se sont des composés qui s'hydratent lentement après la fin d'hydratation des minéraux principaux du clinker.

L'uniformité de la variation du volume entre parmi les essais de contrôle de qualité des produits.

I.1.9.5. La chaleur d'hydratation

L'hydratation des minéraux du clinker est une réaction exothermique. Cette exothermie entraînant l'échauffement de toute la masse du béton peut jouer un rôle positif ou négatif.

Pendant le bétonnage hivernal, l'exothermie ralenti le refroidissement dès la gâchée, ce qui favorise l'évolution de l'hydratation et de durcissement, autrement dit, elle est désirable. Dans les autres conditions, l'exothermie entraîne l'apparition des tensions dans la masse du béton qui peuvent donner la destruction de l'ouvrage.

Il a été établi que le C3S et C3A se caractérisent, non seulement, par un grand effet exothermique, mais aussi, par la grande vitesse de son dégagement. Par contre le C2S et C4AF sont peu exothermiques et leur vitesse de dégagement de chaleur est lente.

L'augmentation de la phase vitreuse dans le clinker, de la finesse de mouture et l'existence de certaines additions accélère l'hydratation et le durcissement.

I.1.9.6. Le retrait et le gonflement

Si l'élément en ciment ou en béton se trouvait dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait.

Si l'élément se trouvait dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement.

Le gonflement entraîne aussi l'apparition des tensions internes, qui cependant, sont moins importantes que celles du retrait.

Le retrait peut être dû au processus chimique, dans ce cas, il est appelé « contraction ».

La valeur du retrait dépend d'un grand nombre de facteurs. Ainsi, les ciments alitiques et à grande finesse de mouture ont un faible retrait.

La diminution de E/C et l'utilisation d'agrégats fins donne le même effet.

La valeur du retrait varie de 3 à 5 mm/m et avec le temps s'annule.

I.2. LES AJOUTS CIMENTAIRES

I.2.1. GENERALITES

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique.

Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques.

Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la Composition du béton. Des ajouts, tels que les cendres volantes le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, les fillers etc., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz. [26].

I.2.2. CLASSIFICATION DES AJOUTS

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau(I.11) ci dessous.

Tab. I.11.Classification des ajouts selon leur réactivité. [28]

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-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, trass phonolithe, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

Tab. I.12. Les constituants des ciments courants
Et leur notation conventionnelle. [16]

Constituant	Notation	Constituant	Notation
Clinker	K	Pouzzolanes industrielles	Q
Laitier granule haut fourneau	S	Cendres volantes calciques	W
Fumée de silice	D	Schistes calcinés calcaire	T
Pouzzolanes naturelles	Z		L
Cendres volantes siliceux	V	Fillers (constituants secondaire)	F

Tab .I.13. Les constituants admis dans les 5 types de ciments courants. [16]

	S	D	Z	V,W	P,Q	T	L	F
Ciment Portland								oui
Ciment Portland composé	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	
Ciment de haut fourneau	oui							oui
Ciment pouzzolanique		oui	oui	oui	oui			
Ciment composé	oui		oui	oui	oui			

I.2.3. BENEFICES DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX

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

- **Bénéfices fonctionnels .**

- incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse)
- il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton
- il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.
- Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.

- **Bénéfices économiques**

- la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation)

- comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.
- **Bénéfices écologiques et environnementaux**
 - diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière
 - élimination des sous-produits de la nature

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique. De fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de LGHF (laitier granulé de haut fourneau) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment.[26]

I.2.4. LES DIFFERENTS TYPES D'AJOUTS

I.2.4.1. Les cendres volantes (V)

Lors de sa combustion dans les centrales thermiques, le charbon pulvérisé passe à travers une zone de très haute température dans le four. Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales tel que l'argile, le quartz et les feldspaths passent en fusion.

Les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères de verre. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipitateur électrostatique.

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

Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (ASTM C 618-94a). [48].

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

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

La majorité des cendres volantes (classes F et C) contiennent approximativement 60% à 85% de verre, 10% à 30% de phases cristallines et 10% de carbone non calciné.

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

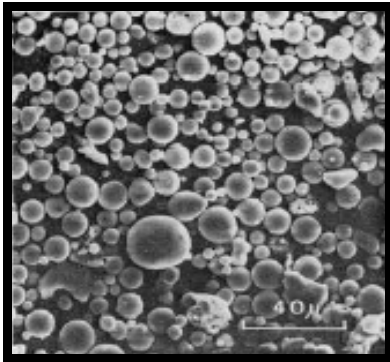


Fig. I.12. Cendre volante. [36]

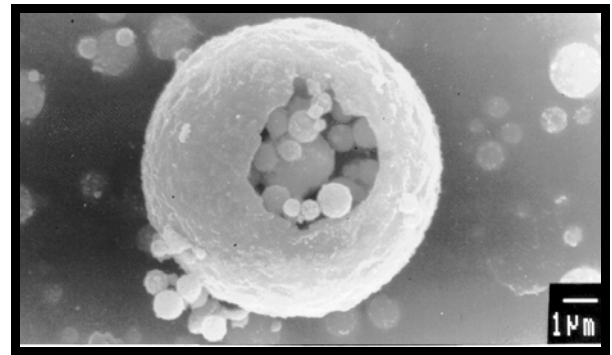


Fig. I .13 . Cendre volante. [18]

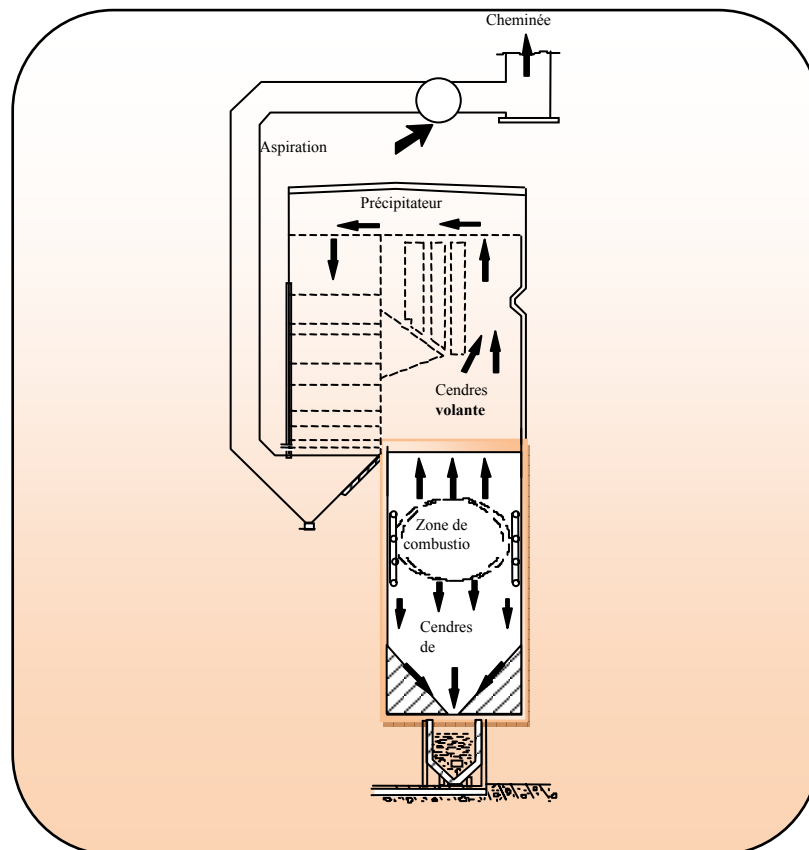


Fig. I.14. Formation des cendres volantes. [18]

I.2.4.1.1. Les cendres volantes de classe F

Elles ont une grande proportion de silice et d'alumine. C'est un verre d'aluminosilicate. Sa vitrification est souvent partielle. La présence de cristaux de mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), de quartz, d'hématite et de magnétite diminue la réactivité de cette cendre volante.

I.2.4.1.2. Les cendres volantes de classe C

Les cendres volantes de la classe C sont plus réactives que celles de la classe F, car tout le Ca est sous forme de phases cristallines réactives (C3A, CS et C4A3S). Par ailleurs, la phase amorphe principale contient suffisamment de Ca pour accélérer la réactivité de l'aluminosilicate.

I.2.4.1.3. Effet des cendres volantes

Les cendres volantes confèrent aux bétons les propriétés suivantes

- ✓ Le remplacement du ciment par des cendres volantes dans le béton réduit de façon

Significative la chaleur d'hydratation.

- ✓ La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur

L'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.

- ✓ Démoulage amélioré.
- ✓ Diminue le ressuage.
- ✓ Réduit les risques de ségrégations.
- ✓ Améliore les performances mécaniques à longs termes.
- ✓ Réduit le coût des ciments, la quantité de fissures et de défauts.
- ✓ Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- ✓ Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- ✓ Un mariage avantageux pour l'environnement.

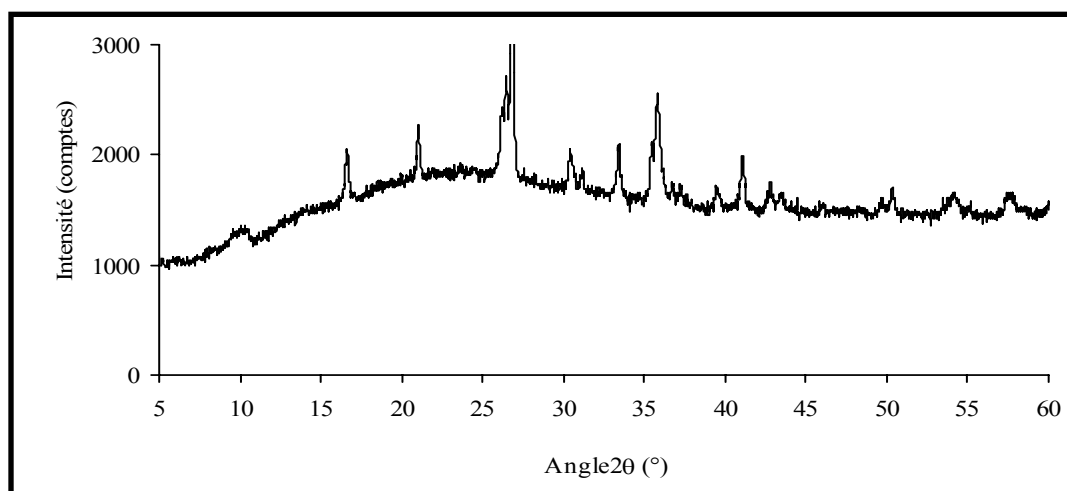


Fig. I.15.DRX d'une cendre volante. [6]

I.2.4.2. Le laitier de haut fourneau

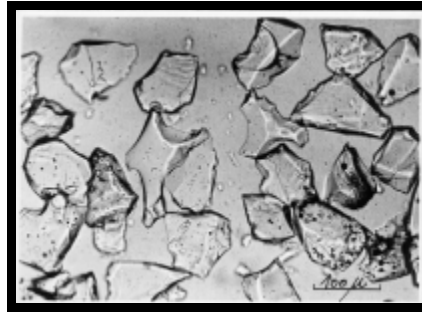


Fig. I.16. Laitier. [36]

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer plus pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 μm pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques. [48]

I.2.4.2.1. Effet du laitier de haut fourneau

En général, le laitier s'hydrate de la même manière que les cendres volantes de la classe C. Cependant, son effet sur la résistance commence à se faire sentir à partir de 7 jours, tandis que les cendres de la classe F ne développent des résistances qu'à partir de 4 semaines.

Les particules de laitier $<10 \mu\text{m}$ contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 μm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules $> 45 \mu\text{m}$ ont de la difficulté à s'hydrater. [26]

I.2.4.2.2. Types de laitier (propriétés et mode de fabrication)

Laitier concasse. C'est un granulat lourds d'aspect anguleux, rugueux, de structure micro alvéolaire de couleur grise il est inattaquable par l'eau, et sa

porosité est inférieure à 10% il s'obtient après le coulage des laitiers dans les poches de 1 à 2 m³ qu'on divise dans fausses de 200 à 300 m de longueur, et de 10 à 12 m de largeur, on laisse refroidir après concassage et criblage, on obtient un granulats normalisés et classés.

Laitier granule. C'est un sable vérifié, très poreux, jusqu'à 60%, il a une couleur grise jaunâtre, de granulométrie jusqu'à 2 mm, et de composition chimique. Silice = 29 à 38 %, chaux = 38 à 48%, alumine = 13 à 20 %, magnésium = 06 %. Pour avoir ce type de laitier, la coulée doit être refroidie brusquement dans un courant d'air ou d'eau. On obtient un sable sec et finement moulu, qui constitue la base du ciment de laitier. Cette opération a pour but d'empêcher la cristallisation, et de maintenir le laitier à l'état vitreux.

Laitier expansé. Il a une structure scoriacée alvéolaire ; de teinte grise, après criblage il se présente en trois classes granulaires de densité variable. Il a une composition chimique proche de. Silice = 25 à 40%, chaux = 38 à 50%, alumine = 10 à 20%, soufre = 01%. Il s'obtient par une puissante injection d'eau, en dessus du laitier en fusion, l'eau vaporise et on obtient des éléments alvéolaires légers. [48]

I.2.4.2.3. Caractéristiques des laitiers

Activité de laitier. Pour apprécier la qualité du laitier comme adjuvant minéral actif des liants, on se sert de plusieurs modules. D'abord, on distingue deux catégories de laitier. Laitier acide et basique.

Laitier acide. C'est un laitier qui contient en majeure partie la silice fondue de 50 à 60%, avec peu d'alumine en présence de 25 à 30% de chaux. Ce type de laitier subit un refroidissement lent.

Le rapport pondéral. (Silice / chaux) ≤ 1.10 .

Laitier basique. Il est très hydraulique pour certaines teneurs en chaux, silice et alumine. Il est obtenu par un refroidissement brusque. Ce type de laitier a un rapport pondéral.

$CaO/SiO_2 \geq 1.3$ il a une composition chimique proche de.

CaO = 40 à 55 % ; SiO₂ = 25 à 35 %, Al₂O₃ = 12 à 25 % ; MgO, SO₃, Fe₂O₃ ; FeO ; soufre, Ces laitiers sont caractérisés par un module de basicité qui répond à la formule.

$$M_b = (CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$$

Si $M_b > 1$. le laitier est acide.

Il y a aussi le module d'activité. $M_a = (SiO_2 / Al_2O_3)$.

Si $M_a = 0.017$ à 0.25 , le laitier est basique, et si $M_a = 0.33$ à 0.40 le laitier est acide. Notons que l'activité hydraulique du laitier croît avec l'augmentation

de ces deux modules c'est-à-dire. Plus le module d'activité est grand, plus la vitesse de durcissement du laitier broyé est rapide.

Pour synthétiser les qualités que doivent avoir les laitiers on peut dire que.

- Il faut que le laitier soit à la limite de vétrification.
- Il faut qu'il contienne le maximum de chaux et d'alumine.

Il faut que la proportion de chaux, de silice et d'alumine doit composer au moins 90%, et le reste composé d'autres corps tels que l'oxyde de fer, l'anhydride sulfurique et magnésie

La qualité de laitier de haut fourneau peut être déterminée par le coefficient de qualité, qui varie d'un pays a un autre.

- en USA. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3)$
- en URSS. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) \cdot 1.2$
- en RFA. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) \cdot 1.6$
- en JAPON. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) \cdot 1.4$. [48]

I.2.4.2.4. Composition chimique

La composition du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minerai Généralement.

Tab. I.14. la composition chimique moyenne du laitier. [14]

constituants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	Fe ₂ O ₃ + FeO
%	30 -50	28-38	12 - 25	02 - 18	01 - 03	1 - 2.5	1 - 2.5

I.2.4.2.5. Composition minéralogique

Si le refroidissement des laitiers est lent, une partie sensible de laitier réussit a se cristalliser sous forme de minéraux stables.

- L'anorthite $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Diopside $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Gehlenite $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Akermanite $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Merwinite $3 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Silicate bi calcique sous forme α , δ & β .
- Tri aluminate penta calcique « C_5A_3 »
- Wollaston ite $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- Rankinite $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Spénelle $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. [14]

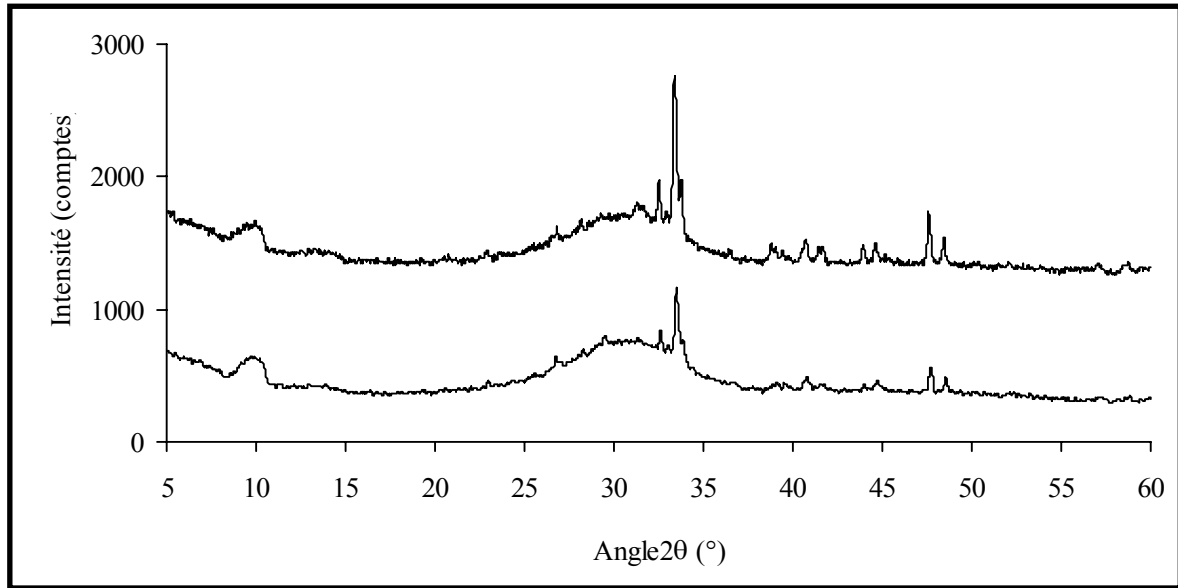


Fig.I.17. DRX de deux différents laitiers [6]

I.2.4.3 . Les fumées de silice

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium . Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 μm . Leur surface spécifique est de 20 m^2/g à 25 m^2/g . La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95%. [48]

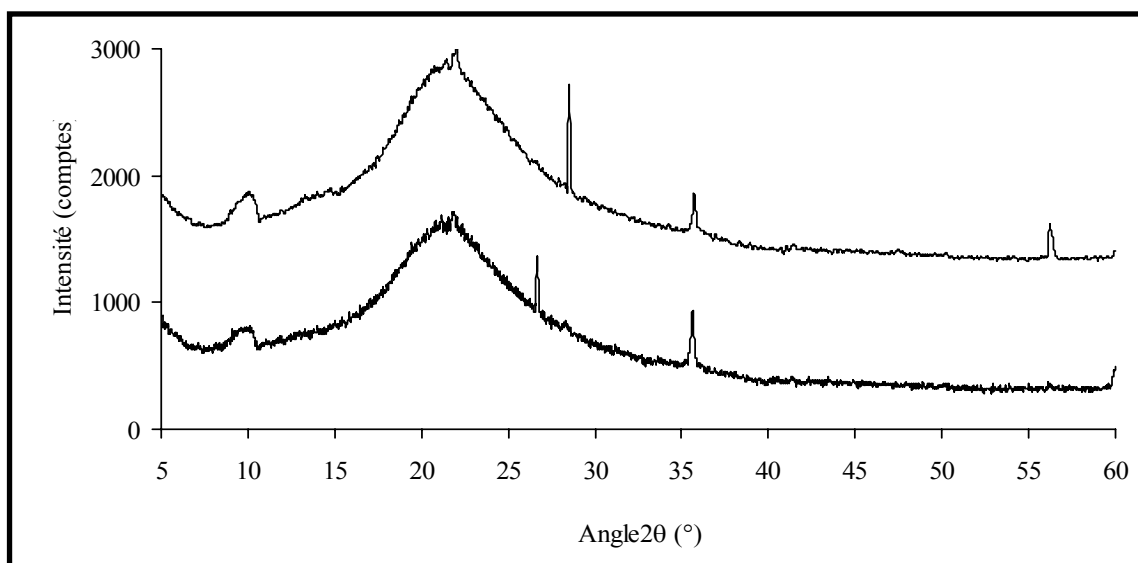


Fig. I.18. DRX de deux différentes fumées de silice [6.3]

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces «poussières» étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

- ✓ Production mondiale estimée à 600 000 t /an. N°1 mondial . Elkem Chemical (Norvège).
- ✓ En France, Pechiney Électrométallurgie a produit en 1992, 40 000 t sur 8 sites de production.
- ✓ Utilisée dans les bétons hautes performances . Augmente la fluidité, la résistance à la compression (qui passe, à 28 jours, de 20-40 MPA à 60-120 MPA) et diminue la perméabilité. [49].

Au départ, son utilisation a été motivée par des arguments économiques, car pour une même résistance, il était possible de produire un béton à moindre coût si une partie des matériaux cimentaires étaient remplacés par la fumée de silice dont le prix de vente était initialement bas. Dans les années 1990, la dégradation des infrastructures a placé l'accent sur des préoccupations au niveau de la durabilité du béton et ainsi, la fumée de silice a trouvé application dans la production de béton à haute performance.

Aujourd'hui, la fumée de silice est peut-être un matériau de choix pour les ingénieurs qui conçoivent des bétons aptes à résister à des conditions d'exposition agressives.

Les fumées de silice jouent un rôle particulier du fait, de leur composition (taux de silice) à (70 %) et , d'autre part de leur finesse (supérieure à 10 000 m² /Kg).

Pierre-Claude Aïtcin explique. La dernière génération de (BHP), les bétons de poudres réactives (BPR) faits de sable, de quartz et de fumée de silice broyés, le tout soigneusement dosé, pousse la performance encore plus loin. La maîtrise de cette technologie permet d'obtenir des bétons dont la résistance à la compression varie de 200 à 800 MPA, ce qui se compare aux meilleurs aciers et composites sur le marché. Les BPR sont déjà très compacts, beaucoup moins poreux que les autres BHP et ils constituent une barrière quasi impénétrables contre le sel.

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'ajout et de stabilisateur. Les microsilies sont un sous-produit de la fabrication du silicium et du ferro-silicium. Au cours de ce processus, on vaporise du sable siliceux à l'arc électrique et puis il est condensé sous forme de fumée de silice dont la taille des particules est comprise entre 0.05 et 0.5 µm. Les microsilies ont composés à 85-95 % d'oxyde de silicium vitreux / hyalin (SiO₂ amorphe) ont une très grande surface spécifique, qui est du même ordre de grandeur que la fumée de cigarettes. [28]

Qu'on l'appelle microsilica, fumée de silice condensée ou plus régulièrement fumée de silice, tous ces termes représentent la même pouzzolane et celle-ci possède des propriétés qui sont bénéfiques au béton.

Les nanosilices sont un précipité siliceux avec une surface spécifique d'environ $200 \text{ m}^2/\text{g}$. Ils se composent de SiO_2 amorphe dont les particules ont un diamètre environ 10x inférieur à celui des microsilices et sont utilisées en qualité de stabilisateur et d'agent de pompage. [46]

1.2.4.3.1. Effet de la fumée de silice

La fumée de silice est l'ajout pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, le SiO_2 amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté (CSH-Gel) avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation du ciment.

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolane conduit à une diminution du PH par rapport à un béton exempt de silices. C'est la raison pour laquelle, il convient dans le cas du béton armé de limiter la quantité maximale de poussières de silice admissibles, par exemple à 11% de la teneur en matières solides de silice, pris par rapport à la quantité de ciment, afin de garantir la protection anticorrosion de l'armature. Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice par la forme sphérique de ses grains, permettent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité et augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant. [31]

Dans le béton frais les fumées de silice induisent les effets suivants.

- ✓ Faible tendance au ressuage, à la sédimentation.
- ✓ Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope.
- ✓ Bon pouvoir de rétention d'eau.
- ✓ Faibles pertes d'air pour le béton à air entraîné.
- ✓ Meilleure adhérence sur le support.
- ✓ Réduction du rebond et amélioration de la résistance du béton projeté.
- ✓ L'évolution de la résistance s'avère plus lente pour des bétons contenant de la fumée de silice que pour des bétons sans fumée. Pourtant la résistance de bétons avec la fumée de silice
- ✓ augmente même au delà de 450 jours. [32]

La fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes

- ✓ Améliore les performances mécaniques à longs termes .
Résistances en compression, flexion et traction.
- ✓ Augmente le module d'élasticité.
- ✓ Réduit le fluage.

- ✓ Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion et la durabilité en milieux agressifs.
- ✓ Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
- ✓ Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- ✓ Facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment.
- ✓ Réduit les risques de ségrégations et la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.

(D'après la Notice technique, Edition avril 2004 ; Sika France S.A.). [42]

I.2.4.4. La pouzzolane

I.2.4.4.1. Définition

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [44]

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins-agrégats et du retrait au séchage.

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

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

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \text{ (réactive)} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. (CSH stable dans l'eau). [47]

I.2.4.4.2. Types de pouzzolane

❖ Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618). [51]

❖ **Pouzzolane artificielle**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi la schiste cuite, et les déchets de l'industrie a base de méta kaolinite. [48]

I.2.4.4.3. Effet de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes.

A l'état frais

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration. [34]

A l'état durci

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

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les Eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à L'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte Une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

I.2.4.5. Les Fillers

I.2.4.5.1. Définition

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante . Produits Obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) Naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près Identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les Gravier. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bombled. IL y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production. [35]

I.2.4.5.2. Effet des Fillers

Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés Physiques sur certaines qualités du ciment .

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire Pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

I.2.4.6. le Gypse

Le gypse est un minéral composé de sulfate hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ainsi qu'une roche évaporitique. Le nom vient du latin gypsum, emprunté au grec gypsos, de même sens. Le gypse est un minéral très commun des séries sédimentaires et peut former des roches mono minérales (régulateur de prise)

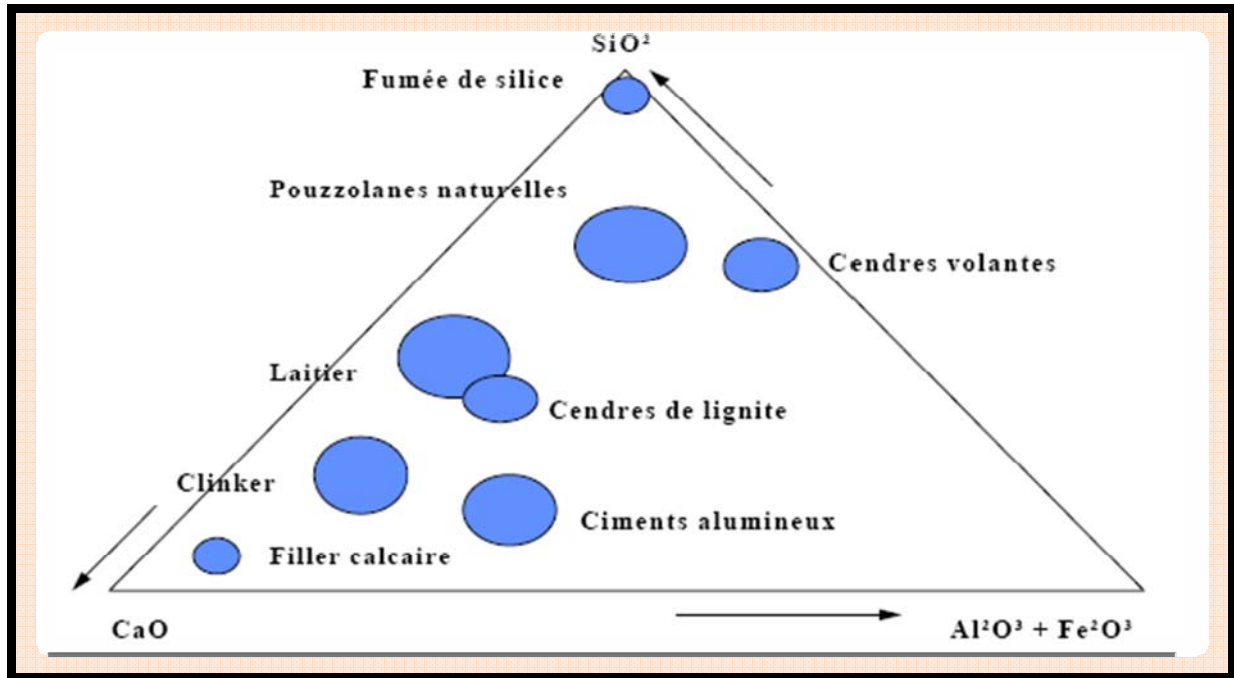


Fig. I.19. Le diagramme de Rankin. [16]

I.2.5. EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIETES DES BETONS

I.2.5.1. Amélioration de l'ouvrabilité

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire.

La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules $> 45 \mu\text{m}$ à un maximum de 34 %.

I.2.5.2. Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton.

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

I.2.5.3. Durabilité

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH.

Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. la perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange.

À cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C_3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

I.2.5.4. Développement des résistances

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

I.2.5.5. Développement des bétons à haute résistance

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur d'eau. Tous les ajouts utilisés en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H. [6]

I.3.LES CIMENTS AVEC AJOUTS

I.3.1. DEFINITION D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL

Ciment obtenu en ajoutant au clinker (entre 65 et 94 %), avant broyage, d'autres composants tels que du laitier, des pouzzolanes, des schistes calcines, des cendres volantes, etc. D'un cout moindre que le ciment Portland, il convient bien pour tous les travaux courants de maçonnerie et de béton arme ou précontraint et pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée mais craint les eaux agressives. Symbole. CPJ. [57]

I.3.2. COMPORTEMENT D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL

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

- ✓ La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- ✓ Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- ✓ Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).[26]

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif. Les substances pouzzolaniques contiennent encore moins, voire pas d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif.

Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton. La fumée de silice représente dans ce groupe l'activité la plus importante, parce qu'elle possède la plus faible part cristalline et la plus grande surface spécifique. Les substances inertes ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins. L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton. [28]

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance.

Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique des ajouts. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice

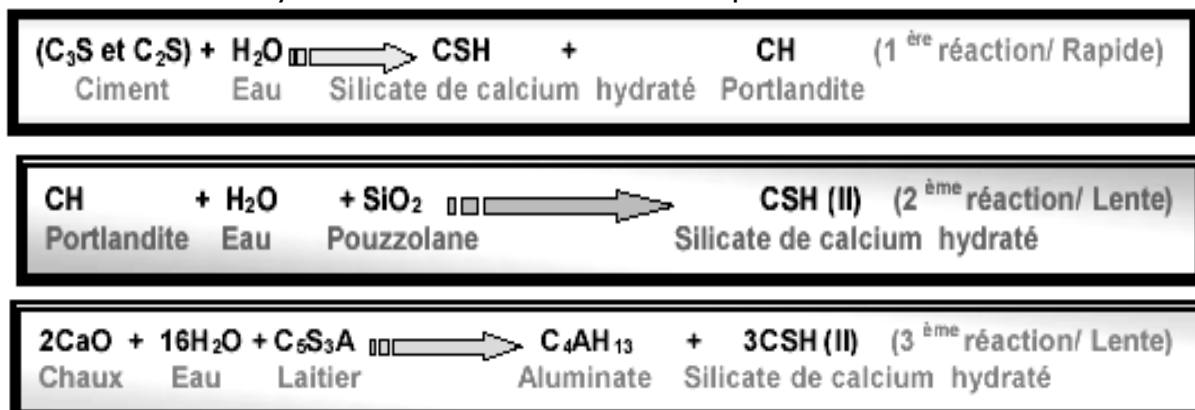
cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons. [30]

I.3.3. CHIMIE D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND AVEC AJOUT

I.3.3.1. Définition

Les différents ajouts minéraux affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que la forme de leur élément. La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, la fumée de silice (SiO_2) permet une réduction de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange. En même temps que l'on mélange le clinker portland et le laitier de haut fourneau, une petite réaction immédiate du laitier se produit et libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite, le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker Portland pour former alors les CSH. [59]

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent.



Les bétons dans lesquels des pouzzolanes remplacent une partie du ciment portland témoignent d'un développement de la résistance plus lent que les bétons avec clinker portland, et d'un plus fort durcissement ultérieur en prenant de l'âge, et exige un apport d'humidité suffisant pendant plus long temps

Parmi les facteurs qui caractérisent l'influence des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et du béton durci . La réaction relativement lente, la consommation d'hydroxyde de calcium et l'action sur la structure poreuse de la pâte de ciment durcie [34].

I.3.3.2. Hydratation et réaction pouzzolanique

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde

de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO, ce qui le contraire pour le ciment portland. Par conséquent, l'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO₂ du pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca (OH) 2 créée par l'hydratation du ciment portland [60].

Les pouzzolanes ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et aluminat de calcium hydraté développant des résistances.

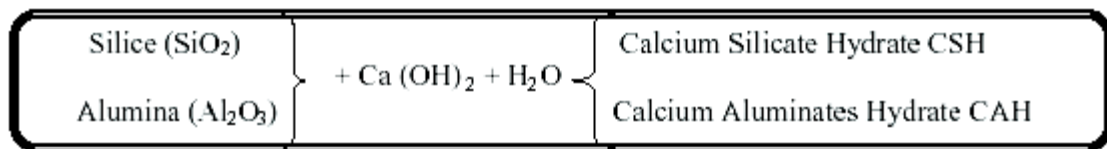
La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker portland (CSH, C4AH13, C8AFH26, C6AS3H32).

Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée.

Au cours de l'hydratation du ciment portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du CSH), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes

La situation est différente en présence de pouzzolanes Le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminat de calcium hydraté (CAH).

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes. [61]



I.3.3.3 . Hydratation du laitier

Les laitiers du haut fourneau sont des matériaux hydrauliques les plus utilisés car leur production est très importante et leurs propriétés sont stables, comparées à celles des autres sous produits industriels

Plus de cent ans d'expérience sur les ciments aux laitiers du haut fourneau a montré clairement leur efficacité dans la confection des structures en béton, et en particulier les structures maritimes [62].

Seul le laitier granulé est utilisé en cimenterie. Il est ajouté au moment du broyage aux autres constituants (clinker, gypse). Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (90 % et plus) de quatre oxydes (SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO) et contenant en quantité insignifiante des oxydes . TiO₂, MnO, FeO et les sulfures .CaS, MnS, FeS. [63]

Les oxydes (Al_2O_3 et CaO) augmentent l'activité hydraulique des laitiers tandis que l'oxyde (SiO_2) la fait diminuer, l'augmentation de MgO jusqu'à 18 % est favorable, car il n'y a pas le risque de gonflement de MgO libre pendant l'hydratation, contrairement au ciment portland. La teneur élevée des (Al_2O_3) donne un développement de la résistance, celle des oxydes de titane et de protoxyde de manganèse est limitée et la teneur en (FeO) est assez petite, n'ayant pas d'effet considérable sur la qualité du laitier, Une faible quantité des sulfures de calcium jusqu'à 7 % accroît peu l'activité du laitier.

La composition chimique du laitier est schématisée par la formule $\text{C}_5\text{S}_3\text{A}$ reflétant la répartition courante des 3 oxydes. [65]

L'hydratation du ciment au laitier est étudiée suivant les cas. absence de gypse, par activation sulfatique et par activation alcaline. Les différents types d'activation conduisent à des produits d'hydratation stables.

Le contenu du ciment au laitier en CSH est considérablement supérieur par rapport au ciment portland, à cause de la production inférieure de la chaux, cette dernière présente dans le ciment au laitier durci seulement en quelques points, tandis qu'elle représente 25% dans le ciment portland [64]. Se sont des gels denses. Constitue une matière de remplissage, où il y a une augmentation de la compacité. La présence élevée de ces gels dans ce ciment conduit à une différence de taille des pores, engendre une diminution relative de la porosité capillaire qui est due de la précipitation des CSH

L'aluminate tétracalcique apparaît dans les milieux riches en chaux et exempts de sulfate, il se forme également à partir de l'activation sodique grâce à la chaux libérée par le laitier. [58]

I.3.3.4. Chaleur d'hydratation du laitier

Le ciment au laitier a un développement de chaleur lent sous les conditions adiabatiques que le ciment portland, ce qui est bénéfique pour protéger le jeune béton de l'apparition des fissures thermiques.

La forme de courbes de l'évolution de la chaleur dépend fortement de l'activant utilisé, le verre soluble est le meilleur activant, il accélère le processus de l'évolution de la chaleur, qui signifie l'occurrence rapide de l'hydratation pendant les quelques premières heures du traitement thermique. [33]

I.3.3.5. Influence de la finesse de mouture sur l'activité du laitier

L'activité du liant remonte avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier de $2000 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4800 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Il a été établi que le laitier trop broyé, ne se prête pas à un stockage de longue durée. Il demande des quantités accrues d'eau lors de la fabrication du liant, d'où l'utilité d'utiliser des laitiers broyés ayant une surface spécifique de $2200 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ qui est rentable du point de vue économique. [33]

I.3.4. CLASSIFICATION DES CIMENTS

I.3.4.1. D'après leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1.

- CEM I. Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- CEM II. Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III. Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV. Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V. Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Tab I.15. Les 5 types de ciments courants et leur composition.[16]

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

I.3.4.2. En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales.

Tab. I.16. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe. [5]

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	P 15-433 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	EN 196-3 (min)	EN 196-3 (min)
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5 R	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	≤ 10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10

Tab I.17. Limite des classes et sous classes de résistances
(Nouvelle norme AFNOR) . [5]

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours minimales maximales	
350	-	-	250	450
450	-	-	350	550
	R (rapide)	150	350	550
550	-	-	450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR Très hautes performances	-	300	550	-

Tab .I.18. Exigences chimiques définies en termes de Valeurs caractéristiques . [36]

Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences
Perte au feu	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	$\leq 5,0 \%$
Résidu insoluble	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	$\leq 5,0 \%$
Sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5 N	$\leq 3,5 \%$
			32,5 R	
		42,5 N	$\leq 4,0 \%$	
		42,5 R		
52,5 N	toutes classes			
52,5 R				
Chlorure	EN 196-21	tous types	toutes classes	$\leq 0.10 \%$
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	toutes classes	satisfait l'essai

I.4. LA CHAUX

I.4.1. HISTORIQUE

Il est à supposer que les hommes de la préhistoire ont découvert la chaux à partir du moment où ils ont maîtrisés le feu. Des pierres calcaires entourant un foyer, le feu brûlant nuit et jour et ces pierres ont fini par se décarbonater. Plus tard, la pluie sur un foyer éteint et la chaux vive s'est hydratée.

Les premières traces de la fabrication organisée de la chaux remontent à 10 000 ans avant J.C. en Mésopotamie (Irak). La plupart des peuples de l'antiquité connaissaient la chaux. Egyptiens, Etrusques, Phéniciens, Grecs, Romains. Elle était utilisée comme liant dans les constructions et servait dans la fabrication d'enduits ou la réalisation de fresques.

Les Romains étaient parvenus à améliorer la qualité de leur mortier de chaux en y ajoutant de la brique pilée. Ils l'utilisaient également pour assécher les sols humides ou pour des applications chimiques.

Les civilisations non méditerranéennes connaissaient également l'usage de la chaux tels que les Incas et les Mayas pour leurs constructions, de même que les Chinois lors de l'édification de la Grande Muraille.

La naissance de l'ère industrielle, avec le développement de la sidérurgie, va entraîner une demande considérable en chaux. Dès lors, ses moyens de production vont sans cesse se perfectionner, ses critères de qualité seront de plus en plus précis de même que ses applications qui se diversifieront sans cesse. [17]

I.4.2. MATIERE PREMIERE

Le calcaire.

Le calcaire est cuit (calciné) pour créer la chaux vive qui contient des oxydes de calcium et de magnésium. Teneurs moyennes de l'écorce terrestre. 4 % en Ca, 7 % en CaCO_3 .

- Le calcium est surtout présent sous forme carbonatée, CaCO_3 (principalement calcite, aragonite) dans des roches calcaires (plus de 50 % de CaCO_3), des dolomies (contenant de la dolomite, $(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$), des marnes (calcite et argile).
- Les Calcaires particuliers. craie (90 à 98 % de CaCO_3), castine (fondant utilisé en sidérurgie, métallurgie, verreries...), stalactites, stalagmites, marbre...
- Les dépôts de calcaire abondent presque partout dans le monde. Les roches calcaires représentent 20 % des roches sédimentaires. Le calcaire est extrait à ciel ouvert. Une partie du calcaire extrait est employé comme

granulat entrant dans la composition des bétons, la structure des chaussées...

Les calcaires sont utilisés sous des formes granulométriques diverses, en agrégats et en moellons, mais aussi broyés, moulus ou micronisés. Ils sont également utilisés sous différentes formes chimiques.

- CaCO_3 (calcaire)
- CaO (chaux vive),
- Ca(OH)_2 (chaux hydratée ou chaux éteinte). [50]

On compte trois types distincts de calcaire, qui sont définis en fonction de leur concentration en carbonate de magnésium (MgCO_3).

1. Le calcaire dolomitique comporte de 35 à 46 % de carbonate de magnésium.
2. Le calcaire magnésien comporte de 5 à 35 % de carbonate de magnésium.
3. Le calcaire à haute teneur en calcium contient moins de 5 % de carbonate de magnésium. [53]

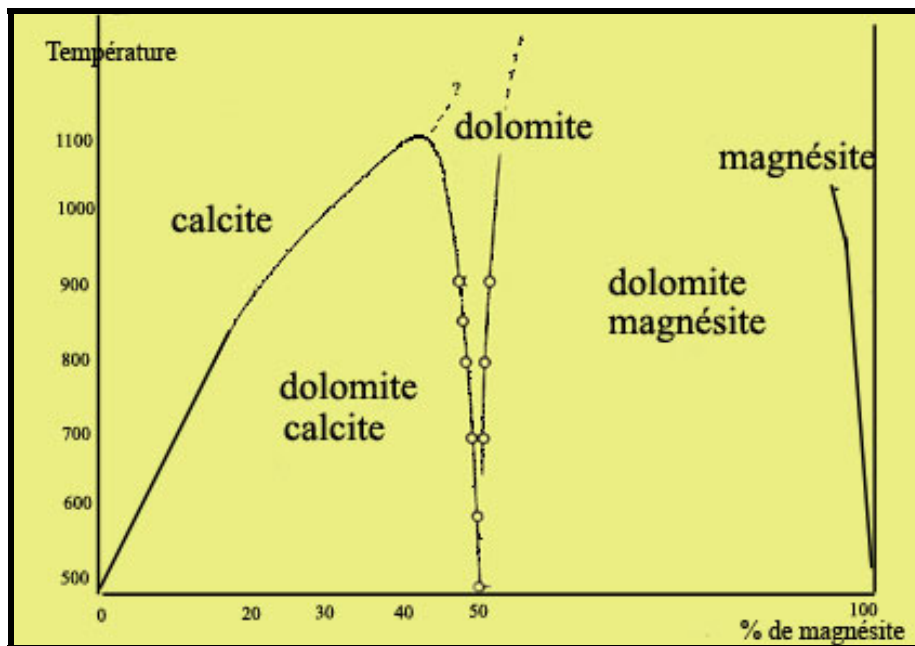


Fig. I.20. Diagramme calcite-dolomite-magnésite. [53]

Le calcaire est utilisé dans une grande variété d'applications, notamment.

- ✓ Ajustement du pH (traitement de l'eau).
- ✓ Agents de remplissage (ciment de maçonnerie, béton).

I.4.3 . FABRICATION DE LA CHAUX

I.4.3.1. La préparation du calcaire

Avant d'être cuit, le calcaire doit être préparé. La première opération consiste à forer des trous à intervalles réguliers. Ces trous sont ensuite remplis d'explosif, puis on procède au tir de mine. Une fois le tir effectué, il subsiste au pied du front de taille des pierres d'une grosseur allant de quelque centimètre à un mètre cube.

Le calcaire est déposé dans des bennes par des pelles mécaniques ou des chargeuses puis transporté vers un concasseur qui réduit sa granulométrie. Il est ensuite criblé.

Il en résulte alors trois produits de granulométries différentes.

- Les 0 à 30 mm pouvant être commercialisés en l'état ou réduit en poudre pour des applications spécifiques. Ils sont destinés à être cuits dans des fours rotatifs.
- Les 30 à 60 mm pour un traitement similaire ou pour leur cuisson en four vertical.
- Les 60 à 200 mm également pour cuisson en four vertical.

I.4.3.2. La cuisson.

❖ Les combustibles.

Il est nécessaire de porter le calcaire à une température suffisamment élevée pour le transformer en chaux vive. Pour ce faire, tout type de combustible peut être utilisé.

- Le gaz naturel (méthane), c'est le plus commode et le plus utilisé.
- Le plus ancien, le bois. Il est employé en buches mélangées à la pierre, ou réduit en sciure, dans les fours modernes.
- Le fuel lourd et ses résidus plus épais, également pour les fours modernes.

Le charbon, qui a pleinement participé à la révolution industrielle, est mélangé au calcaire ou injecté sous forme pulvérulante.

❖ Les fours.

- Le four à alandier.

Certainement le plus ancien et surtout le plus artisanal. Il était composé d'une cheminée, et d'une ouverture à sa base. Les pierres étaient bâties en voute face à l'ouverture, puis elles remplissaient la cheminée jusqu'à son sommet. Un feu était allumé sous la voute puis était alimenté en permanence durant plusieurs jours. La chaux était récupérée après refroidissement. Les quantités produites étaient faibles. Des fours de ce type fonctionnaient encore au début du 20ème siècle pour des utilisations locales.

- Le four à cycles alternés .

Ce type de four est constitué de deux cuves métalliques reliées à leurs bases par un tunnel. Le combustible est injecté au sommet d'une cuve, les gaz

issus de la combustion descendent à travers la masse de calcaire, traversent le tunnel puis viennent chauffer la masse de l'autre cuve. A intervalles réguliers, le cycle s'inverse. Combustion dans la deuxième cuve et réchauffage de la première. Pendant l'inversion, une nouvelle charge de calcaire est introduite dans une cuve, l'équivalent en chaux en est retiré à la base.

Ces fours, de conception récente, ont des capacités de production variant de 100 à 300 tonnes par jour, voire 500 tonnes . Ils acceptent indifféremment des combustibles liquides, solides ou gazeux.

➤ Le four annulaire .

Le four annulaire est également de conception récente. Des brûleurs situés sur deux niveaux différents du four y injectent le combustible. Une partie des gaz issus de la combustion part vers une cheminée centrale. Ces gaz sont alors mélangés à l'air provenant de la base du four, utilisé pour le refroidissement de la chaux. Ils viennent réguler la température de la flamme (et donc la chaleur) fournie par le combustible. Ces fours ont des capacités équivalentes aux précédents et acceptent également tout type de combustible.

➤ Le four rotatif .

Le four rotatif est assez peu employé du fait de sa forte consommation énergétique, cependant il reste indispensable pour la cuisson des petites granulométries.

Il est constitué d'un tube présentant une légère pente et tournant lentement sur son axe. Le calcaire est introduit par l'orifice le plus élevé. Dans le même temps, un brûleur injecte le combustible à l'autre extrémité. La chaux est évacuée en continu par ce même côté. Ces fours acceptent également tout type de combustible et sont très souples en débit. [53]



Fig. I.21. Four à chaux La ville à Montluçon. [52]

I.4.3.3. L'hydratation (L'extinction)

L'extinction est le passage de la chaux vive à la chaux éteinte par le phénomène d'hydratation. A l'issue de cette opération, sa masse volumique augmente ; c'est le "foisonnement" (résultat d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux).

L'extinction. On mélange la chaux vive avec de l'eau. Il existe diverses méthodes.

- ✓ La méthode par arrosage manuel.
- ✓ La méthode traditionnelle par immersion.
- ✓ L'extinction par fusion (ou extinction ordinaire).

Pour les chaux hydrauliques, l'extinction de la chaux vive se réalise à plus de 120 °C, afin d'éviter l'hydratation des silicates et des aluminates. On conserve alors les propriétés hydrauliques.

Pour les chaux communes, grasses ou moyennes, ainsi que pour les chaux hydrauliques, ordre de prééminence des procédés d'extinction .

- 1° extinction spontanée
- 2° extinction par immersion
- 3° extinction ordinaire

Pour les chaux éminemment hydrauliques, l'ordre de prééminence est.

- 1° extinction ordinaire
- 2° extinction par immersion
- 3° extinction spontanée. [53]

I.4.4. LE CYCLE DE LA CHAUX

Tab. I.19. Le cycle de la chaux. [17]

Décarbonatation.		
Calcaire + Cuisson	»»»»	Chaux Vive + dioxyde de Carbone
$\text{CaCO}_3 + \text{T}^\circ$	»»»»	$\text{CaO} + \text{CO}_2$
Hydratation .		
Chaux vive + Eau	»»»»	Chaux éteinte
$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	»»»»	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Recarbonatation .		
Chaux éteinte + Dioxyde de Carbone	»»»»	Calcaire + Eau
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2$	»»»»	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Photo I.1. Calcaire [17]



La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur porté à une température de plus de 1000 degrés. Il se produit alors une réaction chimique: Le calcaire se décompose en chaux vive et en gaz carbonique

Photo. I.2. Chaux Vive [17]



Après cuisson, la chaux vive a gardé le même aspect physique, mais sa masse volumique apparente est devenue plus faible. La chaux vive ainsi obtenue a de nombreuses applications: En agriculture, pour la construction de routes ou dans l'industrie. Elle est employée en l'état, granulée ou broyée.

Photo. I.3. Réaction en cours [17]



La chaux vive est avide d'humidité. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en une poudre blanche appelée chaux éteinte.

Photo. I.4. Chaux éteinte [17]



La chaux éteinte est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, l'industrie, la dépollution. Lorsqu'elle se combine avec le gaz carbonique, elle redevient calcaire

I .4.5. TYPE DE CHAUX

Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs type de chaux.

I .4.5.1. Les chaux aériennes

La chaux aérienne, que l'on trouve sous l'appellation standard **CAEB** (chaux aérienne éteinte pour le bâtiment) est déterminée par la norme NFP 15510.elle correspond à la chaux aérienne, très pure

$\text{CaCO}_3 \text{ ---- } \text{CaO} + \text{CO}_2$ (chaux vive).

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \text{ ---- } \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Q}$ (chaux hydratée-ou Éteinte).

I .4.5.2. Les chaux magnésiennes

On distingue 3 types de chaux aériennes selon le % de calcaire ou d'oxyde de Magnésium

- **Chaux calcique (CL)** . $\text{MgO} < 5\%$
Chaux fabriquée à partir d'un calcaire Ca CO_3 pur ou
Contenant moins de 5% d'oxyde de magnésium MgO . définie par Vicat .alors
de chaux calcique. **CL** (calcique lime). [52]
- **Chaux magnésienne.** $5\% < \text{MgO} < 34\%$.
Chaux fabriquée à partir d'un calcaire Ca CO_3 contenantde 5% à 34%
d'oxyde de magnésium.
- **Chaux dolomitique (DL)** . $34\% < \text{MgO} < 41.6\%$
Chaux contenant de l'oxyde de calcium et de 34% à41% d'oxyde de
magnésium. "DL" (Dolomit Lime) [52]

Ces chaux contiennent MgO ou $\text{Mg}(\text{OH})_2$ après hydratation.

I .4.5.3. La chaux hydraulique .

Provenant d'un calcaire argileux, riche en fer, alumine et surtout en silice (provenant des marnes ou argiles) environ 15 à 20 %.

A température entre 800 et 1500°C, le CaO du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium, des aluminates et des ferro-aluminates de calcium

que l'on trouve sous l'appellation standard **XHN** (chaux **X** Hydraulique Naturelle) c'est déterminée par la norme NFP15310dans la nouvelle norme on parle de chaux hydraulique naturelle .NHL (en anglais Naturel Hydraulique--lime).[52]

I .4.5.4. Familles de chaux

La production contemporaine n'a conservé que les chaux aériennes, et les chaux éminemment hydrauliques.

En fonction du calcaire qu'ils extrayaient, les anciens utilisaient les trois termes de **chaux grasse, moyenne ou maigre**.

Vicat a caractérisé ainsi trois famille de chaux , en déterminant le volume d'eau absorbé pour une masse donnée de chaux vive . [22]

Tab .I.20 . Famille de chaux en fonction du volume d'eau absorbé [22]

TYPE DE CHEAUX	Volume d'eau Quantité de chaux vive	= $\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{CaO}}$
Chaux grasse	2,6 à 3,6	
Chaux moyenne	2,3 à 2,6	
Chaux maigre	1 à 2,3	

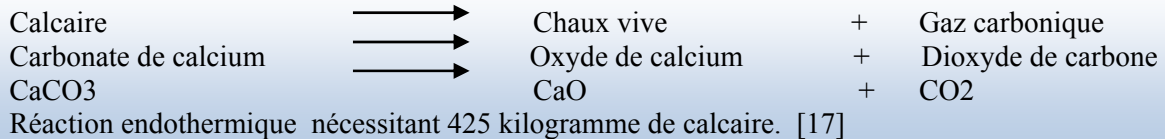
Il ressort de ce tableau que l'obtention d'une chaux en pâte à partir d'une chaux vive issue d'un calcaire pur (la chaux en pâte permet le stockage long d'une chaux aérienne) nécessite au maximum 3,6 litres d'eau par kilogramme de chaux vive.

I .4.6. CARACTERISTIQUES

I .4.6.1. Les chaux aériennes

La calcination, du calcaire (carbonate de calcium) entraine la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

La calcination



Cette réaction s'effectue à une température voisine de 900° C et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45% correspondant à la perte en gaz carbonique . la chaux vive obtenue peut être éteindre lors de l'opération d'extinction ou d'hydratation , en ajoutant de l'eau.

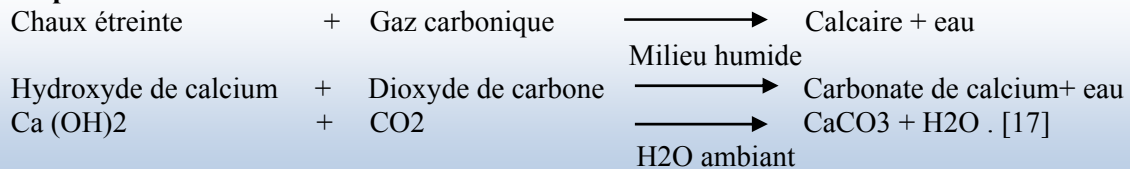
L'extinction



La chaux ainsi éteinte est celle utilisée en construction à l'eau de gâchage, aux agrégats, elle sert à la réalisation des mortiers .

L'ors de la mise en œuvre du mortier, la chaux aérienne va effectuer sa prise ou carbonations en milieu humide . la vapeur d'eau qui a une affinité avec le gaz carbonique contenu dans cet acide et se transforme en calcaire.

La prise



Cette description de la carbonatation est théorique ,la présence fréquente dans le mortier ,de silicates et d'aluminates non combinés (cendre, incuit-sur cuit , issus de la cuisson du calcaire , silicate et aluminate non combiné lors de la calcination ,silice et argile contenue dans les agrégats) conduit à l'hydraulicité des mortiers dans une opération dite de pouzzolanité (voir chapitre 3.1 agrégats ,les autres agrégats page 53) lors de cette réaction les silicates et aluminates réagissent avec la chaux et l'eau lors de l'opération de carbonatation pour former un hydrate stable et insoluble.

I .4.6.2. Les chaux magnésiennes

Dans certains calcaire dites **dolomitique**, le carbonate de calcium est associé au carbonate de magnésium. Cette variante de la roche calcaire forme de la chaux magnésienne, lors de sa cuisson à une température inférieure à 900° C dans les conditions habituelles requises pour l'obtention d'une chaux aérienne.

La chaux magnésienne



I .4.6.3 . Les chaux hydrauliques

Les calcaires purs son le plus souvent mélangés à des marnes et des argiles riches en éléments chimiques comme le fer, l'aluminium et surtout la silice. Entre 800et1500°C, le calcium du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium, mais aussi des aluminates et des Ferro- aluminates de calcium ,la cuisson donne .

Prise des chaux hydrauliques

Par contact avec l'eau, ces corps vont former des hydrates insolubles qui confèrent au liant un caractère hydraulique .les portions en fer sont inférieures à 0,1 ou 0,2 %) le phénomène de prise hydraulique est donc essentiellement dû à la réaction .



La teneur en eau fixée" n " varie, entre 1et 3. [22]

Par la suite au contact de l'air humide, la chaux et les hydrates ainsi formés vont se carbonater (avec le gaz carbonique de l'air) pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine .cette réaction prend plusieurs mois . c'est la partie aérienne de la prise.

I.4.7. PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES**I.4.7.1. Composition chimique**

Tab I.21. Composition chimique de la chaux et de ses constituants.[22]

Composants de base			Poids atomique
Aluminium			30
Silicium			28
Calcium			40
Oxygène			16
Hydrogène			1
Carbone			12
Composés chimiques	Composants principaux	Formule chimique	Poids moléculaire
Calcaire pur	Carbonate de calcium	CaCO_3	100
Chaux vive	Oxyde de calcium	CaO	56
Chaux éteinte	Hydroxyde de calcium	Ca (OH)_2	74
Chaux hydraulique naturelle	Silicate dé calcique	2CaO, SiO_2	172
Ciment	Silicate tricalcique	3CaO, SiO_2	228

(*) Le poids atomique est exprime par rapport au poids du nucléon (neutron-proton) soit $1.66 \cdot 10^E-27$

I .4.7.2. Propriétés chimiques**➤ Solubilité**

La chaux en faible quantité est dissoute dans l'eau le tableau ci après donne la quantité de chaux dissoute dans 100 g de solution.

Tab .I.22 . Solubilité de la chaux en fonction de la température. [22]

Température c°	Gramme pour 100 g de solution saturée	
	Chaux vive CaO	Chaux éteinte Ca (OH) ₂
0	0,140	0,185
10	0,133	0,176
20	0,125	0,165
25	0,120	0,159
30	0,116	0,153
40	0,106	0,140
50	0,097	0,128
60	0,088	0,116
70	0,079	0,104
80	0,070	0,092
90	0,061	0,081
100	0,054	0,071

La solution de la chaux , à température ambiante (10-30C°) est de l'ordre de 0.11à 0.13g pour 100g de solution saturée ; elle augmente à plus faible température .

➤ Réactivité

La réactive définit la rapidité d'action d'une chaux , dans une réaction donnée

Dans le cas de chaux vives , la réactivité dépend de la température de calcination et de la composition du calcaire en cause .

Pour les chaux éteintes , la réactivité est liée aux condition d'extinction.

➤ Base chimique.

La chaux est un corps basique, elle régit avec les acides pour forme des neutres, cette Base chimique est largement utilisée pour neutraliser des acides de tout nature.

I .4.7.3 . Propriétés physiques .

Tab I.23 . Les surfaces spécifiques suivantes de différents Type de chaux. [22]

Type de chaux	Surface spécifique cm ² /g = Blaine
Chaux vive en poudre	3 000 à 10 000
Chaux aérienne	8 000 à 20 000
Chaux hydraulique naturelle	3 000 à 8 000
Ciment	2 700 à 5 000

➤ **Masse volumique et densité**

Tab. I.24. La masse volumique Apparente et la densité De différents Type de chaux. [22]

LIANTS MINERAUX	Masse volumique Apparente (en Kg/m ³)	Densité
Chaux vive	800-1000	0,8-1
Chaux aérienne	490-700	0,49-0,7
Chaux hydraulique naturelle	700-1000	0,7-1
Ciment	800-1300	0,8-1,3

Tab. I.25. le poids spécifique des différents Type de chaux . [22]

	Poids spécifique réel
Chaux vive	2,60
Chaux aérienne	2,20 à 2,50
Chaux hydraulique naturelle	2,60 à 2,90
Ciment naturel	3,00
Ciment artificiel	3,10

➤ **Résistance**

Ces liant ne sont jamais employés purs mais sous forme de mortier , a titre de comparaison , on utilise des mortiers normalisés dont on calcule la résistance à la compression à une certaine échéance , celle -ci est exprimée .

- en bars, pour les chaux aérienne et hydrauliques naturelles ;
- en méga pascal (MPa), pour les ciments.[1]

➤ **Indice d'hydraulicité**

L'indice d'hydraulicité est obtenu par le rapport entre les aluminates / silicates et la teneur en carbonate de calcium du calcaire utilisé lors de fabrication de la chaux.Plus cette valeur est élevée , plu la prise hydraulique est importante

➤ **Indice de clarté**

Il précise une valeur comprise entre 0 et 100.

Les chaux très blanches ont un indice proche de 100 c'est le cas des chaux aérienne ; les chaux hydrauliques naturelles sont légèrement colorées ; cette coloration provient des oxydes contenus dans le calcaire employé [1]

➤ **Résistance au feu**

Un corps résiste au feu tant que la chaleur ne vient pas briser la molécule qui le constitue ou modifier sa structure , s'il n'est pas soumis à de tels processus il résistera au feu jusqu'à atteindre sa température de fusion ainsi .la silice , et les corps ou mélanges qui en contiennent, subit une transformation de structure vers 560° Cet « éclate » à cette température elle n'est pas réfractaire les produits réfractaires ne peuvent contenir de silice ;le calcaire se décompose entre 600 et 800°C ; il perd certaines de ses qualités ; la chaux vive est réfractaire mais la chaux hydratée perd son eau les liants réfractaires sont issus de la chimie de l'alumine et de sa combinaison avec le calcium ce sont les ciments réfractaires (fondus ou frittés) .[1]

➤ **Retrait**

Il est défini par la norme NPF15 433 il ne possède pas d'unité intrinsèque de mesure.

Le retrait est la diminution dimensionnelle que subit le liant durant la prise. L'utilisation de chaux aérienne ou hydraulique naturelle, de ciment pour la fabrication et le mise en œuvre du mortier entraîne des phénomènes de retrait. Selon la résistance mécanique des liant utilisés, la fissuration engendrée peut avoir des effet dommageables, notamment dans les enduits.

L'emploi de liant de faible résistance est préférable. En effet, le retrait engendre alors une fissuration, importante par la taille du réseau, et non par la taille des fissures habituelles, dans le cas des liants très résistants. De plus, avec les liants moins résistants la possibilité de resserrage de l'enduit permet d'accompagner le retrait en fermant les micro-fissures qui se forment progressivement. [1]

I .4.8. LA CHAUX ET LE CIMENT

Tab. I.26. différences chimiques des liants. [38]

	Chaux libre (CaO L)	Bèlite « C₂S »	Alite « C₃S »
Chaux aériennes	100%	0%	0%
Chaux hydrauliques	Oui # 30%	OUI	
Ciments	0%	OUI	OUI

Tab. I.27. Chaux ou ciment de la cuisson à la mise en sac. [38]

La pierre	Avant la cuisson	La cuisson	Après la cuisson	sacs	Poids poudre	norme
Un calcaire pur	Concassage grossier	1000°	Chaux Aérienne Elle fuse (réaction à l'eau)	25 kg en poudre	0.5 kg / litre	CL DL
Un calcaire argileux	Concassage grossier	1000°	Chaux hydraulique Fusion et broyage	40 kg en poudre	0.7 kg / litre	NHL
Un calcaire argileux	Concassage Et ajouts	1450° (Clinkerisation)	Ciment aucune fusion à l'eau On doit broyer les nodules vitrifiés pour avoir une réaction de prise hydraulique	50 kg en poudre	1 kg / litre	Ciment

I .4.9 . LES NORMES

Tab. I.28. Les normes. Tableau récapitulatif. [38]

NORME DES CHAUX		CIMENTS
CALCAIRE PUR	CALCAIRE ARGILEUX	CALCAIRE ARGILEUX
<p>CUISSON à 1000 ° CHAUX VIVE = EXTINCTION à l'eau</p> <p>MVA Poudre = 0,3 à 0,6</p> <p>Surface blaine : 1,5 m2 /gramme</p>	<p>CUISSON à 1000° CHAUX VIVE = EXTINCTION à l'eau et BROYAGE</p> <p>MVA Poudre = 0,4 à 1</p> <p>Surface blaine : 0,8 à 1,1 m2 / gramme</p>	<p>CUISSON > 1 400° VITRIFICATION = sans réaction à l'eau. BROYAGE La mouture + ou - fine détermine la résistance du ciment.</p> <p>MVA Poudre = 1</p> <p>Surface blaine : 0,4m2 /g</p>
CHAUX AÉRIENNE	CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE	CIMENTS
CL ou DL	NHL	CPA. CPJ ...
Résistance : <2 MPa Tests à 1 mois non adaptés.	Résistances : 2 - 3,5 - 5MPa	Résistances > 15 MPa Ciment blanc 50 MPa
Chaux libre 50 à 75%	Chaux libre 15 à 50%	Chaux libre 0%
BÂTARDS		
CL BÂTARDÉE AVEC	NHL BÂTARDÉE AVEC	COUPÉ AVEC
Pouzzolane naturelle Pouzzolane artificielle	20% maxi de ... Pouzzolane naturelle Pouzzolane artificielle	50% maxi de Charges inertes
ou du Ciment	ou du Ciment	
BÂTARDS CHAUX AÉRIENNE + LIANTS HYDRAULIQUES	BÂTARDS CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE + CIMENT	CIMENTS A MAÇONNER
HL	NHL Z	norme 413-1
Résistances : 2 - 3,5 - 5	Résistances : 2 - 3,5 - 5	Résistances : 2 - 3,5 - 5
Chaux libre mini 12 %	Chaux libre mini 15%	Chaux libre 0%
<p>UNITÉS : MVA = Masse volumique apparente (0,5 = 0,5 Kg / litre de poudre.) SURFACE BLAINE en m2/gramme. RC = RÉSISTANCE à la Compression en MPa (2 MPa = 20 Kg/cm2). + de CHAUX LIBRE = + de prise aérienne = enduit plus souple et plus poreux.</p>		

1.4.10. L'UTILISATION DE LA CHAUX

1.4.10. 1. La chaux en agriculture

Les plantes ont leur meilleur développement sur un sol dont le PH est compris entre 6,5 et 7,5. La chaux est utilisée depuis des siècles sur les sols acides, naturellement argileux ou sableux , ou encore devenus acides du fait de l'emploi excessif d'engrais chimiques ou organiques. [55]

1.4.10. 2. Pour l'amélioration et la stabilisation des sols

- Améliore les propriétés géotechniques du sol par son application en accélérant la modification structurelle (sans changer la nature du sol)
- L'apport de chaux dans le remblai améliore.
 - Le comportement à court terme lors de son utilisation par sa réaction avec l'eau excédentaire qu'elle absorbe par son pouvoir flocculant sur les argiles.
 - Le comportement à long terme, en développant la réaction de prise pouzzolanique avec les minerais présents.
- La chaux utilisée pour traiter les sols.
Améliore la stabilité, l'imperméabilité et la portée des fondations
- Les propriétés techniques des sols sont grandement améliorées par la modification de tous les sols à grains fins en particulier les sols argileux et plastiques.
- La réaction avec les surfaces argileuses provoque.
Une réduction de la plasticité.
La réduction de la capacité de détermination de l'humidité, la diminution de la dilatation.
Une meilleure stabilité par la construction d'une couche à base solide.[69]

1.4.10.3. La chaux pour le bâtiment

▪ Construction

La chaux aérienne est principalement employée pour les enduits et la décoration, la chaux hydraulique lui est préférée pour l'édification de murs en pierres ou en moellons, réalisation de sous bassements, dalles, etc.

▪ Enduits et décoration

La chaux accepte tout type de support. Terre, pierre, brique, bois..... Elle a la particularité d'être perméable à l'air et imperméable à l'eau évitant ainsi la condensation. Les mortiers de chaux sont utilisés pour le rejointoiement et les enduits des constructions neuves ou en restauration. Les peintures à la chaux, prêtes à l'emploi remplacent avantageusement les anciens badigeons Les constructions en pisé refont leur apparition dans de nombreuses régions.

▪ Béton cellulaire

Léger et excellent isolant, le béton cellulaire est fabriqué à partir d'un mélange de chaux vive, de sable de ciment, de poudre d'alumine et d'eau.

La réaction chaux/alumine provoque la formation de minuscules bulles de gaz. Ces bulles, piégées dans la masse, confèrent les propriétés isolantes des blocs de béton.[55]

1.4.10. 4. La chaux dans l'industrie

- **Sidérurgie**

La chaux y est employée pour séparer la fonte ou l'acier des impuretés qui l'accompagnent. Ces impuretés forment le laitier.

- **Traitement des métaux**

La chaux est utilisée pour purifier la bauxite lors de la fabrication de l'aluminium. Elle évite la formation des silices aluminates, inutilisables, et améliore ainsi les rendements de production. Elle est également employée pour la production de Zinc, Cuivre, Plomb, Or, Argent, Uranium de par son aptitude à séparer les sels métalliques et autres impuretés du minerai

- **Industrie Pharmaceutique**

Par exemple dans les pâtes dentifrices pour son apport en calcium mais également pour ses propriétés désinfectantes et cicatrisantes. Elle entre également dans la composition de nombreux médicaments. [55]

1.4.10. 5. La chaux et l'environnement

- **Traitement des eaux**

Dans les eaux de consommation ou de certains process industriels, la chaux intervient comme agent de précipitation et de floculation. Pour décarbonater les eaux trop dures, par précipitation de CaCO_3 et ajuster le PH.

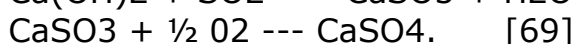
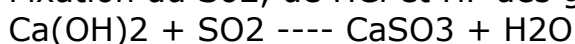
Elle est aussi employée dans le traitement des eaux usées pour flocculer les matières organiques, les phosphates issus des détergeants, pour précipiter les sels de métaux lourds des eaux industrielles et comme bactéricide par élévation du PH. Enfin elle est utilisée pour déshydrater, stériliser et stabiliser les boues issues du traitement des eaux. [69]

- **Traitement des effluents gazeux**

Les combustibles, tels que le Fuel lourd ou le charbon contiennent naturellement du soufre en quantité plus ou moins importante suivant leur provenance. Les déchets ménagers et aussi certains déchets industriels dégagent également du soufre ou du chlore au cours de leur incinération. Ces émissions de soufre et de chlore sont à l'origine des pluies acides.

Il existe différents procédés pour neutraliser ces émissions de gaz acides.

Fixation du SO_2 , de HCl et HF des gaz de combustion.



I.5.METHODES D'ACTIVATION DU CIMENT AVEC AJOUT MINERAL

I .5.1 . BUT

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout (C.P.A-C.E.M I). Ce type de ciment (CPJ-CEM II) présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M 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) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

1.5.2. DIFFERENTES METHODES D'ACTIVATION

1.5.2.1. Activation chimique

Généralement le liant hydraulique (C.P.J. ciment portland composé) est activé par différentes solutions alcalines, telles que . l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages en faisant varier la molarité de la solution basique.

Les activateurs chimiques (accélérateurs de prise et de durcissement) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Ce sont surtout .

- * des alcalis (soude . NaOH , potasse . KOH) pour la prise,
- * des chlorures de calcium (CaCl_2) pour le durcissement.

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2% du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsque un durcissement rapide est souhaité.

La prise du ciment est généralement lente, l'ajout des activateurs chimiques et le broyage plus poussé du ciment présentent des solutions à ce phénomène.

1.5.2.2. Activation thermique

L'activation thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) consiste à conserver le matériau (éprouvette) dans une étuve à vapeur à différentes températures de cure 20°C , 40°C et 60°C pendant 7 jours. Ensuite, il sera mis dans un bassin d'eau à une

température de 20 °C jusqu'à la date de l'essai mécanique programmé (7, 14 et 28 jours).

1.5.2.3. Activation mécanique

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse (surface spécifique) du ciment par broyage poussée. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante).

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède .

- plus de C_3S ,
- moins de C_3A ,
- le plus possible de petits cristaux.

Selon certains chercheurs, plus le rapport .

$[(C_3S + C_2S) / (C_3A + C_4AF)]$ est élevé, plus facile est le broyage.[70]

II.1.PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le plan des essais expérimentaux réalisés comporte les points importants suivants :

II.1.1.Préparation des ciments étudiés (ciment+chaux)**1 ° Méthode : Activation par addition**

Tab. II.1 : Activation par addition

N° d'activation	Composition	Liant Cim + Chaux	ciment	chaux
		(%)	(%)	(%)
Témoin	CEM ₀₀	100	100	0
ACTV N°1	CEM ₊₂	102	100	2
ACTV N°2	CEM ₊₄	104	100	4
ACTV N°3	CEM ₊₆	106	100	6
ACTV N°4	CEM ₊₈	108	100	8
ACTV N°5	CEM ₊₁₀	110	100	10

2° Méthode : Activation par substitution

Tab. II.2 : Activation par substitution

N° d'activation	Composition	Liant Cim + chaux	ciment	chaux
		(%)	(%)	(%)
Témoin	CEM ₀₀	100	100	0
ACTV N°6	CEM ₋₂	100	98	2
ACTV N°7	CEM ₋₄	100	96	4
ACTV N°8	CEM ₋₆	100	94	6
ACTV N°9	CEM ₋₈	100	92	8
ACTV N°10	CEM ₋₁₀	100	90	10

II.1.2. Les essais réalisés

❖ **Détermination des propriétés physiques :**

Pour 13 échantillons (11ciments activés et non activé, chaux et sable).

- ✓ la masse volumique absolue. (ciments, chaux et sable)
- ✓ la masse volumique apparente. (ciments, chaux et sable)
- ✓ la consistance normale (pâtes de ciment).
- ✓ début et fin de prise (pâtes de ciment).
- ✓ surface spécifique Blaine (ciments)

❖ **Détermination des propriétés chimique :**

Pour 13 échantillons.

- ✓ Fluorescence aux rayons X (ciments, chaux et sable)

❖ **Granulométrie à laser :**

Pour 11 échantillons. (Ciments)

❖ **Comportement mécanique du mortier :**

Pour (mortier à 7j+28j+90j) ,33 moules, soit 99 éprouvettes

- ✓ Essai de compression.
- ✓ Essai de flexion.

Pour (mortier à 3j+7j+28j) ,33 moules soit 99 éprouvettes

- ✓ Essai de retrait. (mortier)
- ✓ Essai de gonflement. (mortier)

II.2. METHODES D'ESSAIS ET NORMES

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

Tab. II.3. Méthodes d'essais normalisés en Europe. [38]

Objet soumis à l'essai	Propriétés mesurées	Référence de la méthode
Ciments	Détermination de la consistance normalisée	NF EN 196-3 § 5
Ciments	Détermination du temps de prise	NF EN 196-3 § 6 NF P 15-431
Ciments	Détermination de la finesse par perméabilité de l'air (méthode Blaine)	NF EN 196-6 § 4
Ciments	Mass volumique réelle	NF EN 196-6 § 4.5.3 ASTM C188-72
Ciments	Analyse granulométrique des ciments méthode par diffraction (à laser)	NF X11-666
ciments	Analyse chimique –spectrométrie F-R-X	NF EN 196-2
sable	Équivalent de sable	NF EN 933-8
sable	Détermination de la granularité	NF EN 933-1
Mortier	Résistance à la flexion	NF EN 196-1 § 9.1
Mortier	Résistance à la compression	NF EN 196-1 § 9.2
Mortier	Essais de retrait	NF P15-433
Mortier	Essais de gonflement	NF P15-433

II.3.METHODES D'ESSAIS ET LIEUX DE REALISATION

Tab. II.4. Lieux de réalisation des essais

Objet soumis à l'essai	Propriétés mesurées	Lieux de réalisation
Ciments	Détermination de la consistance normalisée	Laboratoire Cimenterie Ain Touta Batna
Ciments	Détermination du temps de prise	Laboratoire Cimenterie Ain Touta Batna
Ciments	Détermination de la finesse par perméabilité de l'air (méthode Blaine)	Laboratoire Cimenterie Ain Touta Batna
Ciments	Mass volumique réelle	Laboratoire Cimenterie Ain Touta Batna
ciments	Analyse chimique –spectrométrie F-R-X	Laboratoire Cimenterie Tbessa
Ciments	Analyse granulométrique par diffraction (laser)	C-R-D - Bouverdes
sable	Équivalent de sable	L.N.H.C -Batna
sable	Détermination de la granularité	L.N.H.C -Batna
Mortier	Résistance à la flexion	Laboratoire Cimenterie Ain Touta Batna
Mortier	Résistance à la compression	Laboratoire cimenterie Ain Toua Batna
Mortier	Essais de retrait	Laboratoire cimenterie Ain elkebira Sétif
Mortier	Essais de gonflement	Laboratoire cimenterie Ain elkebira Sétif

II.4.DESCRPTION ET MODE OPERATOIRE DES ESSAIS

II.4.1. ESSAIS SUR CIMENTS

II.4.1.1 : Ciments anhydres

II.4.1.1.1.Masse volumique absolue (ASTM C 188-72). [39]

❖ **Objectif de l'essai**

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre de la chaux Et des différentes compositions préparées de ciment activité par la chaux.

❖ **Principe de la mesure**

(avec le chatelier-Voluménomètre)

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit

lorsqu'on y introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue.

La méthode nécessite également une balance au

décigramme,voluménomètre et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre:

ce sera par exemple du tétrachlorure de carbone, si la poudre est du ciment (ou bien on peut remplacer le tétrachlorure par le pétrole).

❖ **Équipement nécessaire**

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

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

Remplir l'appareil de tétrachlorure de carbone jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1. Éviter de mouiller les parois lors du remplissage. Immerger le voluménomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20±1 °C. Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de ciment de 64 g ± (0% ,2%,4%,6%,28%,10%) g de chaux à 0,1 g près.

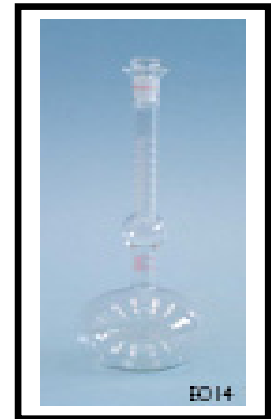


Photo. II.1 Densimètre
Le Chalier [39]

Repérer exactement le niveau atteint N_0 . Verser le ciment très lentement (en $\frac{1}{4}$ d'heure environ) dans l'appareil en prenant garde à ne pas déplacer le volumétre contenant le ciment, de récipient et le poser sur la table.

Boucher le volumétre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l'air. Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_1 du liquide après équilibrage de température.

La masse volumique absolue est donnée par le rapport:

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

D'après.[12]

II.4.1.1.2. Mesure de la finesse (EN 196-6) .d'après [20]

❖ Objectif de l'essai

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

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

❖ Principe de l'essai

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

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

❖ **Équipement nécessaire.**

- Un appareil appelé «Perméabilimètre de Blaine». Photo. II.2
- Une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester
- Un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère.
- La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.
- Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini
- Une balance précise à 0,001 g.
- Un chronomètre précis à 0,2 s près.
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule.
- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air



Photo. II.2. Perméabilimètre de Blaine [39]

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

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

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

- La masse de matière à prendre s'écrit: $m = (1 - e) P_v$. [20]

ρ - masse volumique

V - volume utile de la cellule.

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

Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.

Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.

Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.

Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur. Enduire de vaseline la partie rondée de la cellule et la placer sur son ajutage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.

L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.

Noter le temps écoulé t ainsi que la température de la pièce.

Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.

La surface spécifique est calculé par la formule:

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \quad [12]$$

S – Surface spécifique (cm^2/g).

k – Constante del'appareil..

e – Porosité de la couche tassée.

t – Temps mesuré en secondes.

ρ - Masse volumique (g/cm^3).

η - Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises). [39]

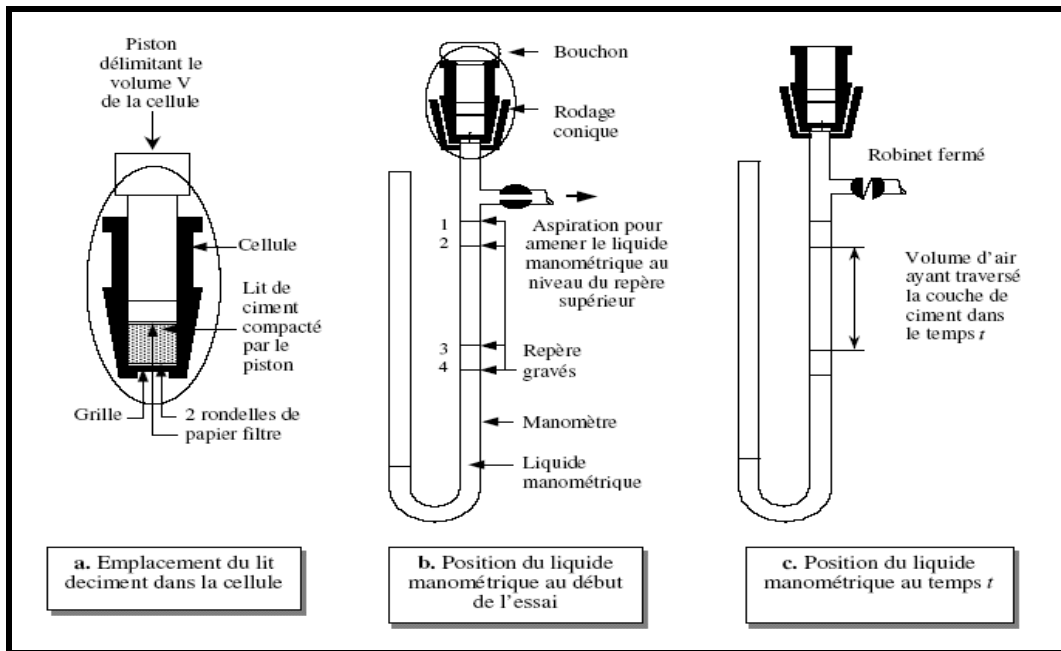


Fig. II.1. Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine.[20]

II.4.1.2 : Pâtes de Ciment

II.4.1.2.1. Mesure de la consistance de la pâte. (NF EN 196-3). [20]

❖ Objectif de l'essai

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

1. L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196-3.2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NF P-18-358.

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

❖ Principe de l'essai

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

❖ **Equipement nécessaire**

- ✓ Un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn) - Un appareil de VICAT. L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre. La partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible). (**Fig. II.3**).
- ✓ Une balance permettant de peser à 1 g près.
- ✓ Une Chronomètre précis à 1 s près.

❖ **Conduite de l'essai**

500 g de ciment $\pm(0\%,2\%,4\%,6\%,8\%,10\%)$ g de chaux sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

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

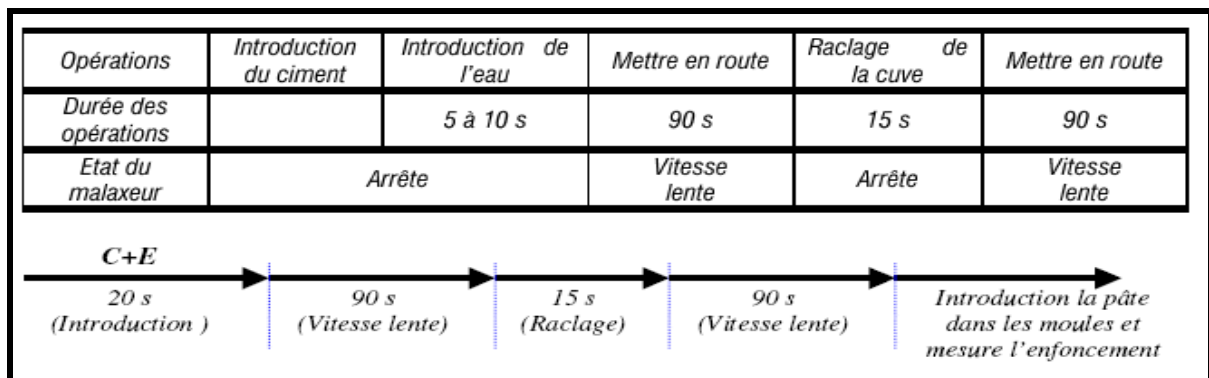


Fig. II.2. Principe de préparation de la pâte [12]

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

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

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

- Si (d) = $6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.a.d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

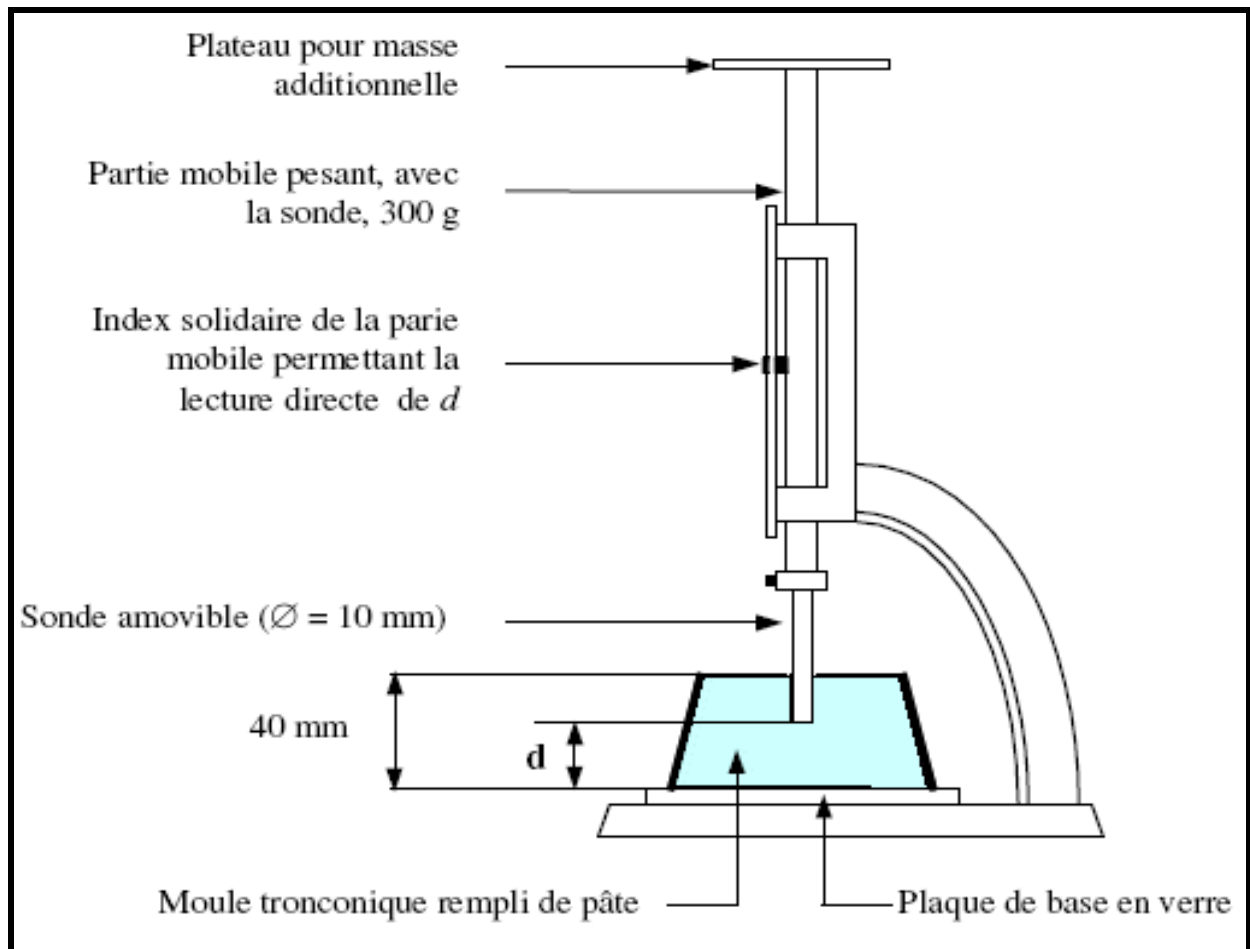


Fig. II.3. Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance [20]

II.4.1.2.2. Mesure des temps de début et fin de prise (NF EN 196-3)

❖ Objectif de l'essai

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

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

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm .[19]

❖ Equipement nécessaire

✓ Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans Une salle, dont la température est de $20^{\circ}\text{ C} \pm 1^{\circ}\text{ C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%.

A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ}\text{ C} \pm 1^{\circ}\text{ C}$.

✓ Malaxeur normalisé:

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

✓ Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français).

L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. (Photo. II.4).

✓ Balance précise à 0,1 g près.

✓ Chronomètre précise à 0,1 s près.



Photo. II.3 Appareil de VICAT [39]

❖ Conduite de l'essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée:

On préparera 500g de ciment \pm (0%,2%,4%,6%,8%,10%) g de chaux, une pâte pure de rapport E/C=0,26. Ceci permettra de préparer les moules. Pour accélérer les phénomènes, on dissolvera dans l'eau de gâchée du chlorure de calcium (CaCl₂) en prenant comme poids de CaCl₂, 2% du poids d'eau calculé pour la gâchée. On versera l'eau avec l'accélérateur de prise dissous dans la cuve du malaxeur, contenant le ciment, on déclenchera les deux chronomètres, (un pour la gâchée, un autre pour base du temps, pour la manipulation).La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par une mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat.Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base. Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~ 10-15 mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné .[20]

II.4.1.2.3. Granulométrie a laser. [40]

❖ Principe

L'analyse des échantillons à été réalisé à l'aide d'un GRANULOMETRE A LASER DE TYPE MASTERSIZER, qui est un kit.

Les statistique de la distribution sont calculées d'après les résultats, en utilisant les dérivés $D[m,n]$.

D(v,0.5), **D(v,0.5)** et **D(v,0.9)** sont des mesures standards de percentiles de l'analyse.

D(v,0.5) est la taille de particules pour la quelle 50% de l'échantillon à une taille inférieure et 50% de l'échantillon à une taille supérieure à cette taille,

D(v,0.1) est la taille de particules pour laquelle 10% de l'échantillon se trouve en dessous de cette dimension.

D(v,0.9) est la taille de particules pour laquelle 90% de l'échantillon se trouve en dessous de cette dimension.

D(4.3) est le diamètre moyen (volume)

D(3.2) est le diamètre moyen pondéré en surface. Cette valeur est également connue sous le nom de diamètre de Sauter.

➤ Le **span** est la mesure de la largeur de la distribution. La largeur se calcule par la formule ci-dessous :

$$\frac{D(0.9) - D(0.1)}{D(0.5)}$$

- **Concentration** est la concentration volumique.
- **Distribution** indique le type de distribution .
- **Obscurisation** aide à fixer la concentration de l'échantillon lorsque celui-ci est ajouté au dispersant. La plage idéale s'étend de 10% à 30%.
- **Uniformité** est une mesure de l'écart absolu à partir de la médiane.
- **Lecture du rapport** .

Size Low (μm) et In (%) : Représentent respectivement le diamètre des grains et les fractions équivalentes.

Size High (μm) est under (%) : Montrent le diamètre des grains et les pourcentages cumulés.

➤ Lecture de la courbe.

Le graphe se présente sous forme de l'échelle logarithmique.

L'abscisse(X) indique le diamètre des grains en μm et l'ordonnée (Y) avec deux échelle, dont , l'échelle de droite est relative aux pourcentage (%) des fractions lues sur la courbe de fréquence (forme de cloche); L'échelle de gauche , indique le pourcentage (%) cumulé dans le cas où une courbe cumulative est représentée (for de «S»).

❖ Description sommaire du granulomètre.

- Un analyseur de type (banc long) composé essentiellement d'un générateur de source LASER (He-Ne 633 nm), de différentes lentilles interchangeables relatives aux largeurs de gammes granulométriques (0.05 μm à 900 μm , 0.5 μm à 900 μm , 5 μm à 3.5mm), 44 détecteurs et une carte électronique d'interface.
- Deux échantillonneurs et deux chambres d'analyses voie (humide,sèche).
- Un ordinateur de type Compaq pentium.
- Un logiciel MALVERN, caractérisé par la théorie de Mie

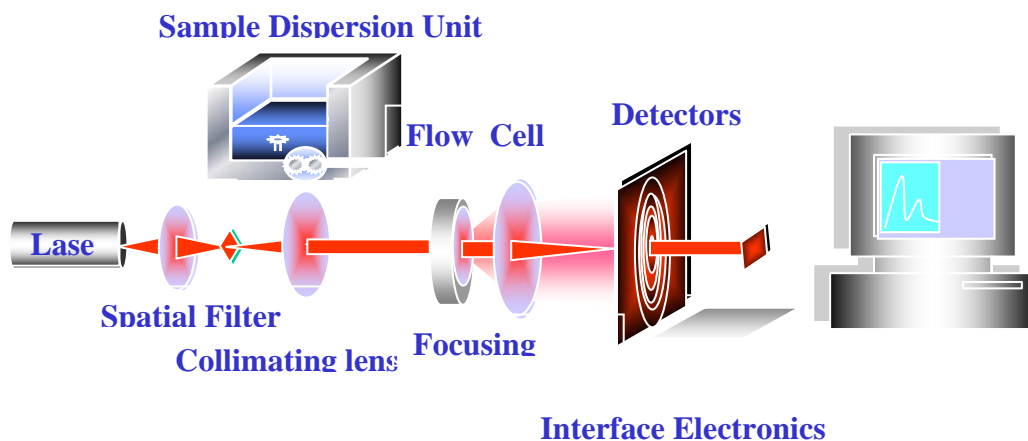


Fig. II.4. Description du granulomètre. [40]

II.4.2. ESSAIS SUR SABLE

II.4.2.1. Analyse granulométrique par voie sèche (EN 933-1) .[20]

❖ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

❖ Matériel nécessaire

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisées soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser (Photo II.4) électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.(Fig II.5). La dimension nominale de tamis se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt{10}$.

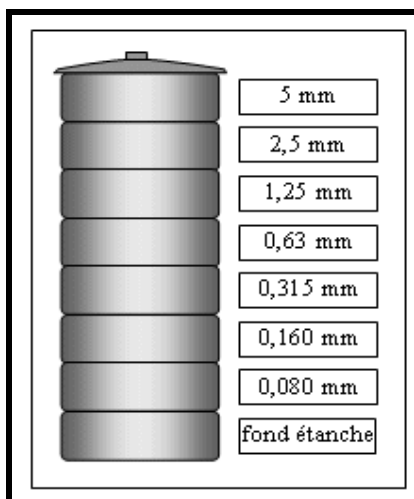


Fig. II.5: Colonne de tamis [12]



Photo II.4. Tamiseuse électrique [12]

Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes :

Tab. II.5:Dimensions nominales des tamis.[20]

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

❖ Conduite de l'essai

Cet essai peut s'appliquer pour des granulats non souillés par une fraction argileuse significative. Il est alors impératif de prendre toutes les précautions nécessaires pour que les éléments fins, présents dans l'échantillon, ne soit pas perdus.

Pour les échantillons pollués par une fraction argileuse, il est nécessaire de procéder par voie humide. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (Masse M 2). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

❖ Dimension de tamis utilisés

Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 20, 23, 26, 39, 32, 35, 38. Pour les matériaux plus grossiers, tous les tamis au-delà du module 38 seront utilisés.

❖ Préparation de l'échantillon

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires:

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse à utiliser sera telle que : $M = 0,2 D$ avec M, masse de l'échantillon en Kg et D diamètre du plus gros granulats exprimé en mm

❖ Description de l'essai

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de $105 ^\circ\text{C}$. On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le

haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera tamisat le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesée. Soit R_1 la masse de ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 la masse du deuxième refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisat présent sur le fond de la colonne dutamis est également pesé.

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisat sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2% du poids total de l'échantillon de départ.

II.4.2.2. Détermination de la masse volumique absolue d'un sable (NF EN 1097-6) . [38]

❖ But de l'essai

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

❖ Détermination de la masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse

volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 . La masse volumique absolue moyenne des granulats silico-calcaires est prise égale, en première approximation, à $2,65 t/m^3$ ou $2,65 g/cm^3$.

❖ Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
2. Peser un échantillon sec M de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique est alors:

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad [20]$$

Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée en verre de 500 cm^3 de volume. La lecture des niveaux V_1 et V_2 doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.

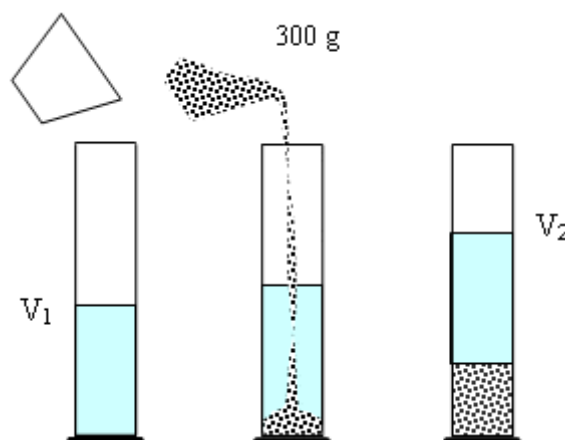


Fig. II.6: Méthode de l'éprouvette. [20]

II.4.2.3. Mesure la propreté du sable

(l'essai d'équivalent de sable NF EN 933-8).[19]

❖ But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

❖ Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- ✓ hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- ✓ hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est (figure II.7). L'essai dit d'équivalent de sable-permet de déterminer le degré de propreté du sable.

$$ES = \frac{h_1}{h_2} 100$$

D'après [19]

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston)

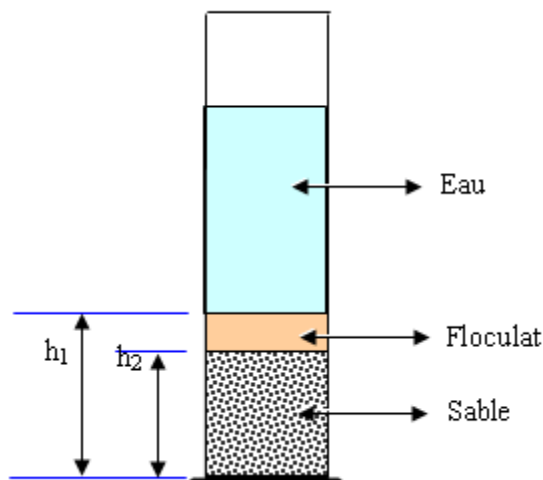


Fig. II.7: Définition de l'équivalent de sable. [19]

II.4.3. ESSAIS SUR MORTIER

II.4.3.1. Mesure des résistances à la compression et à la traction (EN 196-1)

❖ **Objectif de l'essai**

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

❖ **Principe de l'essai**

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

❖ **Equipement nécessaire**

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

✓ Une salle maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.

✓ Une chambre ou une armoire humide Maintenu à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %. (Photo. II.5)



Photo. II.5 armoire humide

✓ Un malaxeur normalisé (Photo. II.6)



Photo .II.6: malaxeur normalisé pour pâte et mortier

✓ Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes 4×4×16").



Photo. II.7: Moules pour éprouvettes de mortier

✓ Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.



Photo. II.8: appareil à chocs

✓ Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s \pm 10N/s. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la Photo.II.9



Photo. II.9 : machine d'essais de résistance à la flexion

✓ Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s \pm 200 N/s. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure.



Photo. II.10 : machine d'essais à la compression

❖ Conduite de l'essai

Pesé des constituants : nécessaires aux essais : avec précision de 0.5%

1. Sable =1350 g
2. Ciments =450 g de ciment \pm (0% ,2%, 4%,6%,8%,10%)g de chaux
3. Eau =225 g , soit (E/C = 0.5) , quantité qui donne le même affaissement pour tous les mortiers préparés

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

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

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tab. II.6.limites de temps . [19]

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	~28 j
Précision	$\pm 15\text{ min}$	$\pm 30\text{ min}$	$\pm 45\text{ min}$	$\pm 2\text{ h}$	$\pm 8\text{ h}$

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

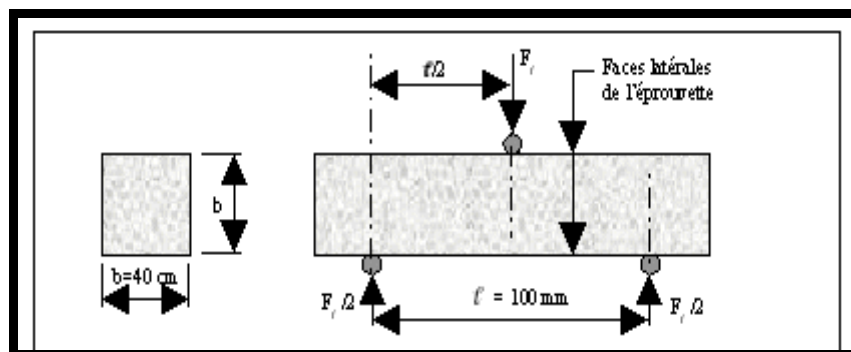


Fig. II.8: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion. [12]

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

inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1,5 F_f l}{b^3} \quad . [20]$$

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

$$R_f (MPa) = 0,234 F_f (N). \quad .[20]$$

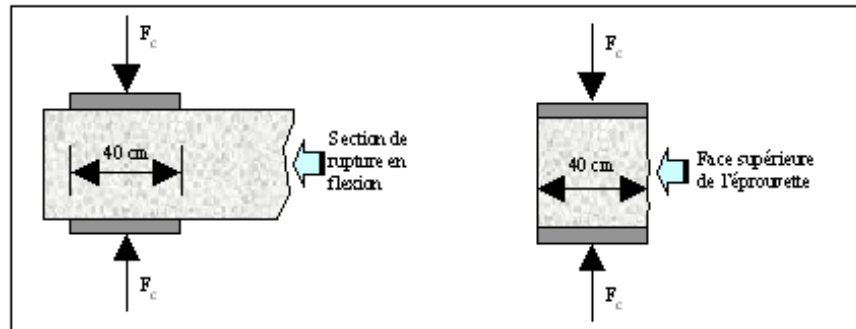


Fig. II.9. Dispositif de rupture en compression.[20]

Les demis-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure 5.4.3. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad .[20]$$

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

$$R_c (MPa) = \frac{F_c (N)}{1600} \quad .[20]$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 MPa près et on en 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. Auquel cas il convient de chercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conversation Lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.

Résistance normale

La résistance dite résistance normale pour un ciment donné est la résistance ainsi mesurée à l'âge de 28 jours. C'est cette résistance qui définit la classe du ciment : si un ciment a, (à 28 jours), une résistance normale de 42 MPa, on dira que sa classe vraie est de 42 MPa. [20]

II.4.3.2. Mesure du retrait et gonflement sur éprouvettes de mortier**(NF P 15-433)****❖ Objectif de l'essai**

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes de mortier normal.

❖ Principe de l'essai

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16$ cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

❖ Equipement nécessaire

Il est décrit dans la norme NF P 15-433.

✓ Une salle maintenue à une température de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à $50 \% \pm 5 \%$.

✓ Eventuellement deux bains d'eau dont la température est maintenue à $20 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ et $5 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$. Un malaxeur normalisé (figure II.7)

✓ Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ sont donc munies à leurs deux extrémités de plots comme indiqué sur la (figure II.9).

✓ Un déformètre tel que celui montré sur la photo. II.11. Équipé d'un comparateur permettant de réaliser Des mesures avec une exactitude inférieure ou Égale à $0,005 \text{ mm}$. Une tige de 160 mm de Longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre Cette tige en Invar de façon à ce que Les variations de température qu'elle peut connaître Au cours de la manipulation n'entraînent pas de Modification appréciable de sa longueur.



Photo. II.11: Déformètre

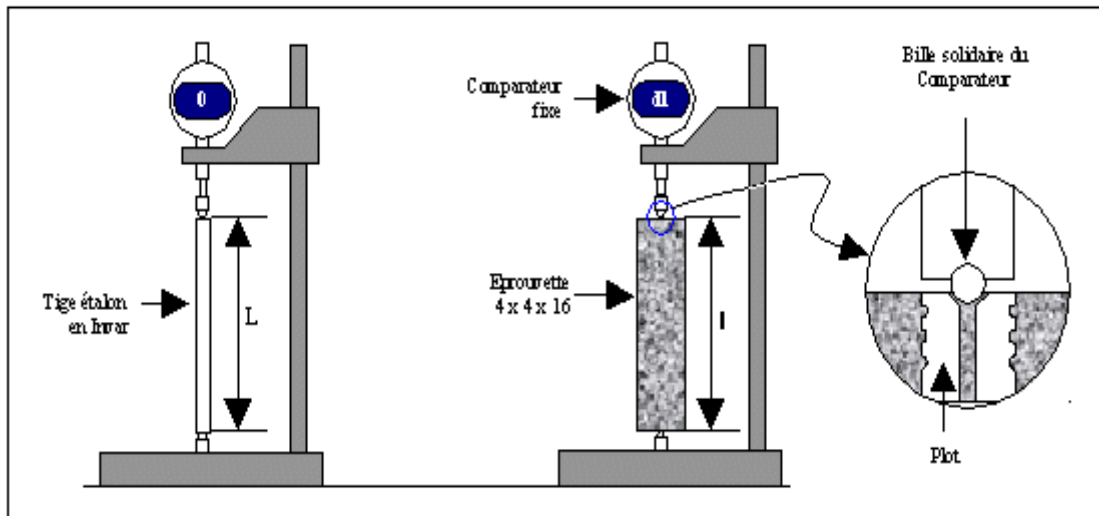


Fig. II.10. Appareillage pour la mesure du retrait. [20]

❖ Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160$ mm. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.

CHAPITRE . III

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES



- III.1. La chaux
- III.2. Le ciment
- III.3. Le sable

III.1. LA CHAUX

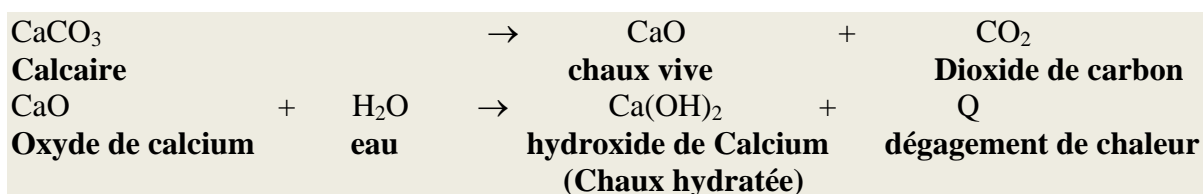
La chaux utilisée est celle de l'entreprise de conditionnement de chaux De l'est wilaya de Saida

Chaux hydratée [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hydroxyde de Calcium]

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ l'activant minéral utilisé pour le ciment de laitier avec des proportions de 2%, 4%, 6%, 8% et de 10% par diverses méthodes (substitution et addition dans la masse du ciment de laitier). L'information sur les propriétés physiques et la composition chimique de l'activant minéral (chaux hydratée) utilisé sont données comme suit :

III.1.1. Constituants

Elle est fabriquée à partir d'un calcaire CaCO_3 contenant moins de 5% d'oxyde de magnésium MgO .



III.1.2. Classification

La chaux hydratée utilisée dans cette étude est une chaux de calcium : $\text{MgO} < 5\%$.

III.1.3. Composition chimique

Tab.III.1. Composition chimique (% , en poids) de la chaux hydratée utilisée

Oxydes (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
Chaux hydratée	0.46	0.22	0.35	68.56	0.65	0.05	0.03	0.24

III.1.4. Caractéristiques physiques

Tab.III.2. Caractéristiques de la chaux hydratée utilisée dans cette étude

Matériaux	Densité absolue (g/cm ³)	densité apparente (g/cm ³)	Surface spécifique (finesse) cm ² /g
Chaux hydratée	2.32	0.54	8150

III.2. LE CIMENT

Le ciment utilisé a été ramené de la Cimenterie de Hadjar-soud (CHS)
L'information sur les propriétés physiques. Sa composition chimique est donnée comme suit :

III.2.1.Classification

Ciment portland composé CPJ - CEMII/A 42.5

III.2.2.Constituants

Tab.III.3. Constituants minéraux du ciment étudié

Ciment utilise CEM II	Clinker (%)	Régulateur de prise "Gypse" (%)	Ajout "Laitier" (%)
Hadjar-Soud	75	5	20

III.2.3.Composition chimique

Tab.III.4.Composition chimique des matières premières utilisées

constituants %	CaO	Al₂O₃	Fe₂O₃	SiO₂	MgO	Na₂O	K₂O	Cl	SO₃	PAF	HR
Calcaire	54.90	0.20	0.20	0.60	0.20	0.06	0.07	0.001	0.03	43.40	0.50
Argile	6.50	17.00	7.60	52.70	2.00	0.60	1.40	0.001	0.32	10.20	--
Minerie de fer	0.90	9.00	50.00	20.92	0.48	0.30	1.00	0.001	0.12	7.30	--

Tab.III.5.Composition chimique du clinker utilisé

Constituants %	CaO	Al₂O₃	Fe₂O₃	SiO₂	MgO	Na₂O	K₂O	Cl	SO₃	PAF	CaO_L
clinker	65.40	5.90	3.20	21.70	1.20	0.16	0.40	0.02	0.20	0.60	1.20

Tab.III.6.Composition chimique des ajouts utilisés

Constituants %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	H ₂ O
Gypse	8,06	2,53	1,04	30,97	2,58	0,38	0,07	32,64	21,86	14,92
Laitier	36,00	7,37	4,44	42,73	4,15	0,41	0,16	1,37	1,01	-

Tab.III.7.Composition chimique du ciment utilise

Oxydes %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	CaO _L	SO ₃	PAF	LSF
CEMII/A	23,0	5,9	2,9	58,7	1,5	0,7	0,4	2,4	2,4	80,2

III.2.4.Caractéristiques physiques

Tab.III.8.Caractéristiques physiques du ciment utilise

• Masse volumique absolue	$\rho_s = 3.019$ (g/cm³)
• Masse volumique apparente	$\rho_a = 0.997$(g/cm³)
• Consistance normale	$E/C = 0.28$
• Début de prise	DP=160 minute
• Fin de prise	FP =250 minute
• Surface spécifique Blaine	SSB= 3272,81 (g/cm ³)

III.3. LE SABLE

Granulats fins (Sable) :

Le sable utilisé dans cette étude provient des abords de l'oued Maïter. Cet oued est situé entre les collines de Boussâada, entre lesquelles souffle un vent provenant du sud chargé de grains fins.

Ce sable est d'origine éolienne, c'est un sable de dune, du moins ses grains fins.

Le sable de dune de Boussaâda, siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surfaces lisses, est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal qui n'excède pas 3,0 mm.

III.3.1. Composition chimique

Tab.III.9.Composition chimique du sable de dune utilisé

Eléments	Teneurs (%)
Silice (SiO ₂)	94,00
Alumine (Al ₂ O ₃)	0,88
Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃)	0,37
Oxyde de magnésium (MgO)	0,11
Oxyde de calcium (CaO)	2,96
Perte au feu (P.A.F)	1,50

III.3.2. Caractéristiques physiques

Le module de finesse calculé est: $M_f = 1.76$. L'information sur les propriétés physiques du sable utilisé dans le (tableau.III.10)

Tab.III.10. Caractéristiques physiques du sable de dune utilisé

Matériaux	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Compacité (%)	Porosité (%)	Équivalent de sable
Sable de dune	2,56	1,64	64,06	35,94	76/78

III.3.3. Analyse granulométrique

Tab.III.11: Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiels en(g)	Refus cumules en(g)	Refus cumules en(%)	Tamisats cumules en(%)
5	0,00	0,00	0,00	0,00
2.5	189,81	189,81	9,49	90,51
1.25	29,97	219,78	10,99	89,01
0.63	129,87	349,65	17,48	82,52
0.315	482,51	832,16	41,61	58,39
0.16	606,40	1438,56	71,93	28,07
0.08	534,48	1988,04	99,40	0,60
Fond	25,32	1998,36	99,92	0,08

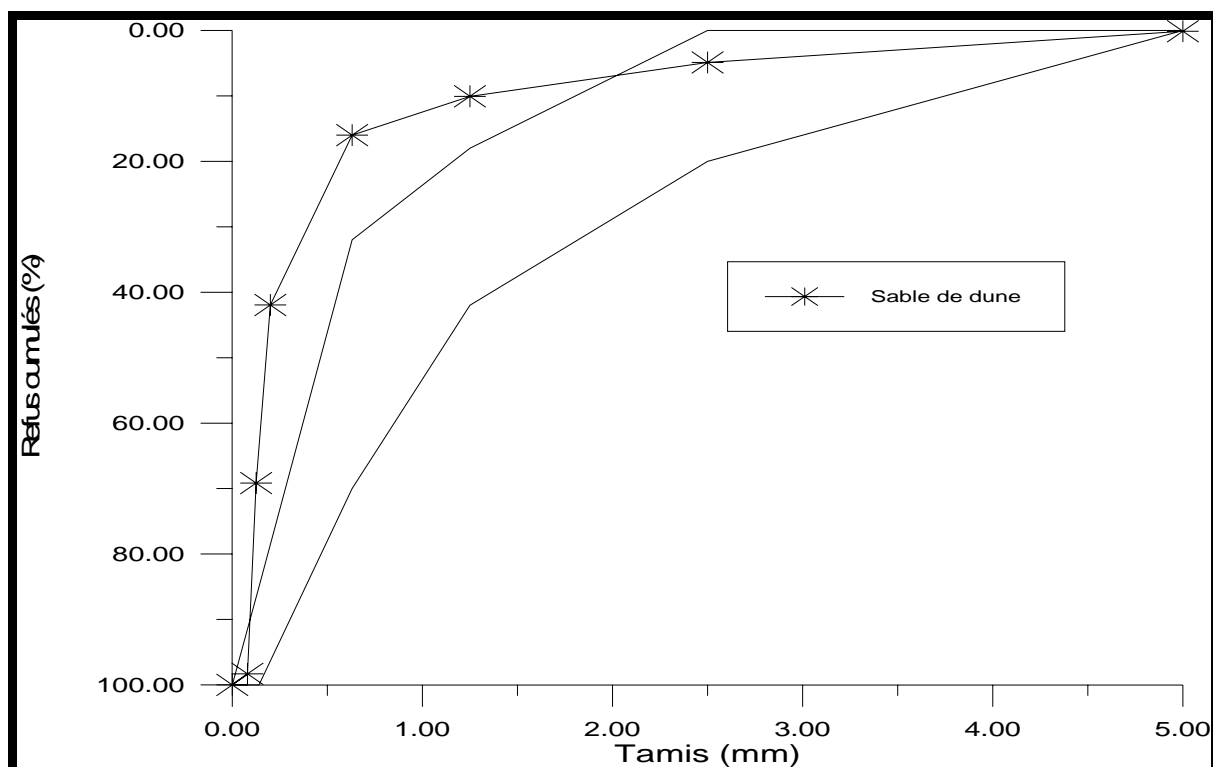


Fig.III. 1. "Courbe granulométrique du sable testé dans le fuseau préférentiel prévu par la norme russe".

III.4. L'EAU DE GACHAGE

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

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable (eau de robinet) fournit au laboratoire de la Cimenterie de Ain Touta.

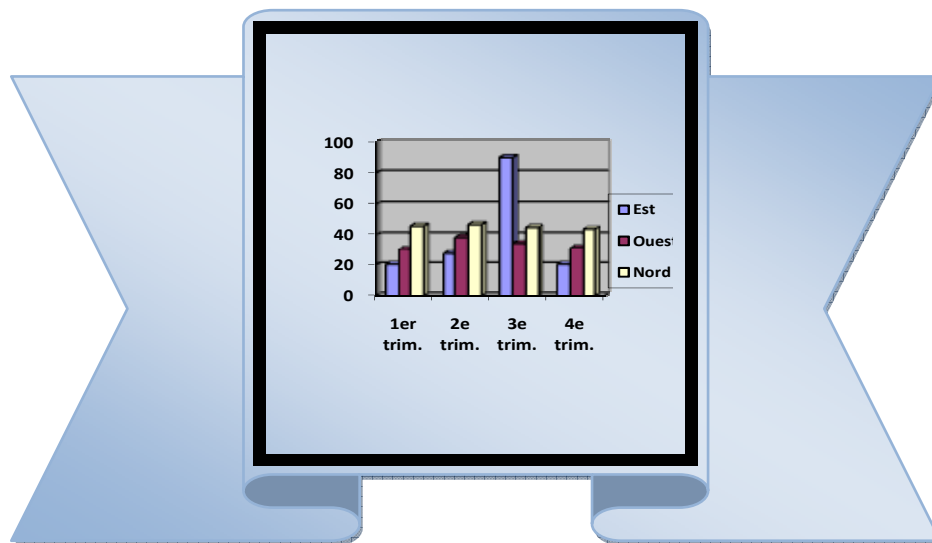
L'analyse chimique effectuée au service concerné du laboratoire.

Tab.III.12: Analyse chimique et minéralogique de l'eau de gâchage

PARAMETRES ORGANIQUE	UNITE	QUANTITE QUALITE	NORME AF P 18 303
Couleur	Unit	Claire	
Odeur	Dilut	Bonne	
Gout	Dilut	bon	
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE			
PH		7,94	≥4
potentiel redox Eh	MV	-60,6	
conductivité a 20°C	µS/CM	1926	
turbidité	NTU	2,05	
Oxygène dissous	MG/L	5,47	
Salinité	%	9	
CO2 libre	MG/L	9,26	
CO2 total	MG/L	223,96	
PARAMETRES DE POLLUTION			
ammonium	MG/L	0	
nitrate NO3	MG/L	8,6	≤ 500
D.MINIRALISATION			
Calcium Ca ++	MG/L	200	
magnésium Mg ++	MG/L	37,2	
chlorures Cl-	MG/L	265	
sulfates SO4-2	MG/L	760,48	
Bicarbonate HCO3-	MG/L	244	
Carbonates CO3-2	MG/L	0	
Dureté totale TH	F°	80,5	
Dureté permanente	F°	60,5	
titre alcalin complet	F°	20	
fer F+2	F°	0,04	

CHAPITRE .IV

RESULTATS ET INTERPRETATION



- V.1.Essais Réalisés
- IV.2.Résultats Obtenus
- IV.3.Interprétation Des Résultats

IV.1.ESSAIS REALISES

- ❖ **Détermination des propriétés physiques des ciments étudiés :**
 - ✓ la masse volumique absolue (poudres de ciment).
 - ✓ la consistance normale (pâtes de ciment).
 - ✓ début et fin de prise (pâtes de ciment).
 - ✓ surface spécifique Blaine (poudres de ciment)
- ❖ **Détermination des propriétés chimiques des ciments étudiés :**
 - ✓ Fluorescence aux rayons X (Poudres de ciment).
- ❖ **Granulométrie à laser :** (Poudres de ciment)
- ❖ **Comportement mécanique, Retrait et Gonflement du mortier :**
 - ✓ Essai de compression.
 - ✓ Essai de flexion.
 - ✓ Essai de retrait.
 - ✓ Essai de gonflement.

IV.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS**IV.2.1. Composition chimique**

Analyse par spectrométrie de fluorescence aux rayons X.

Tab. IV.1 : Compositions chimiques des ciments étudiés

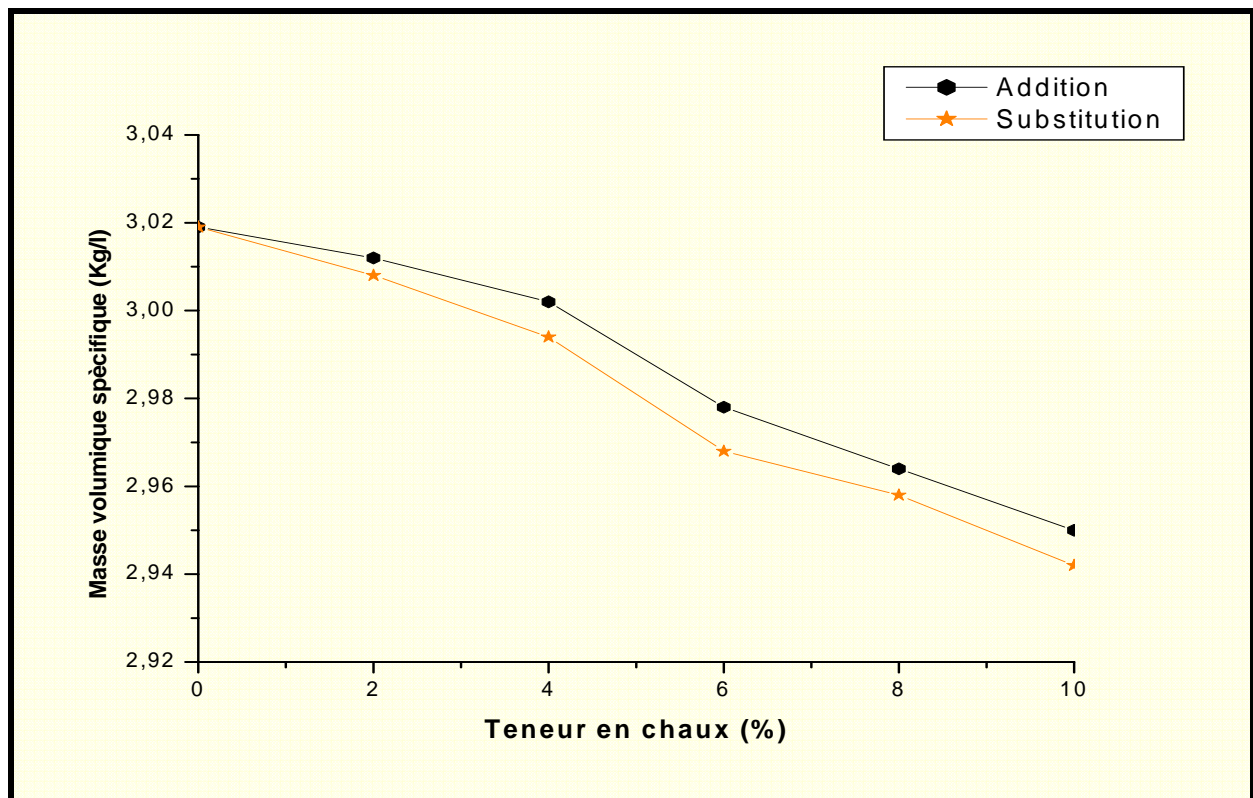
Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	CaOL	PAF	LSF
CEM ₀₀	23,0	5,9	2,9	58,7	1,5	0,7	0,4	2,4	2,4	80,2
CEM ₊₂	22,3	5,6	2,8	59,2	1,6	0,7	0,8	2,3	3,0	83,7
CEM ₊₄	21,9	5,6	2,8	59,9	1,5	0,7	2,1	2,3	3,3	86,1
CEM ₊₆	21,4	5,4	2,8	60,4	1,5	0,7	2,6	2,3	3,8	89,2
CEM ₊₈	20,7	5,1	2,7	60,8	1,5	0,6	3,2	2,2	4,1	92,5
CEM ₊₁₀	20,6	5,0	2,8	61,9	1,5	0,6	3,8	2,2	4,5	94,3
CEM ₋₂	21,9	5,4	2,8	59,0	1,5	0,7	0,8	2,3	3,0	85,2
CEM ₋₄	21,6	5,3	2,7	59,2	1,5	0,7	1,8	2,3	3,4	87,2
CEM ₋₆	21,1	5,1	2,7	60,1	1,5	0,6	2,1	2,2	4,0	90,1
CEM ₋₈	20,5	5,0	2,8	60,6	1,5	0,6	2,9	2,1	4,4	93,3
CEM ₋₁₀	19,9	4,9	2,6	61,3	1,5	0,6	3,3	2,1	4,6	98,5

IV.2.2. La masse volumique absolue

Tab. IV.2 : Variation de la masse volumique absolue des ciments étudiés

Activation	Masse volumique Absolue (kg/l)
CEM ₀₀	3,019
CEM ₊₂	3,012
CEM ₊₄	3,002
CEM ₊₆	2,978
CEM ₊₈	2,964
CEM ₊₁₀	2,950
CEM ₋₂	3,008
CEM ₋₄	2,994
CEM ₋₆	2,968
CEM ₋₈	2,958
CEM ₋₁₀	2,942

Figure. IV.1 : Variation de la masse volumique absolue des ciments étudiés

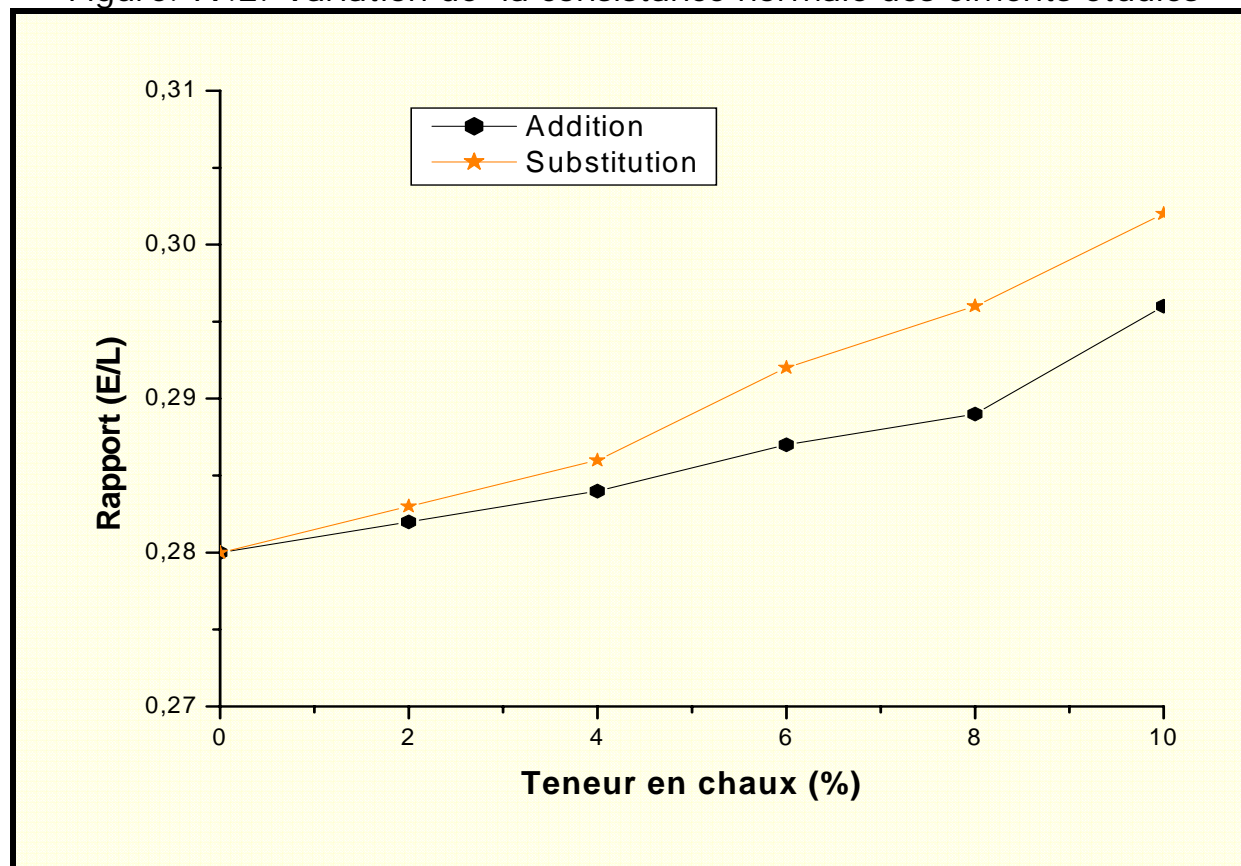


IV.2.3. La consistance normale

Tab. IV.3 : Variation de la consistance normale des ciments étudiés

Activation	Poids des constituants de la pâte en (g)				Consistance E/L
	Cim	Chaux	Liant = cim+chaux	Eau	
CEM ₀₀	500	00,00	500	140	0,280
CEM ₊₂	500	10,00	510	143	0,282
CEM ₊₄	500	20,00	520	146	0,284
CEM ₊₆	500	30,00	530	149	0,287
CEM ₊₈	500	40,00	540	156	0,289
CEM ₊₁₀	500	50,00	550	160	0,296
CEM ₋₂	490	10,00	500	141	0,283
CEM ₋₄	480	20,00	500	143	0,286
CEM ₋₆	470	30,00	500	146	0,292
CEM ₋₈	460	40,00	500	148	0,296
CEM ₋₁₀	450	50,00	500	151	0,302

Figure. IV.2: Variation de la consistance normale des ciments étudiés

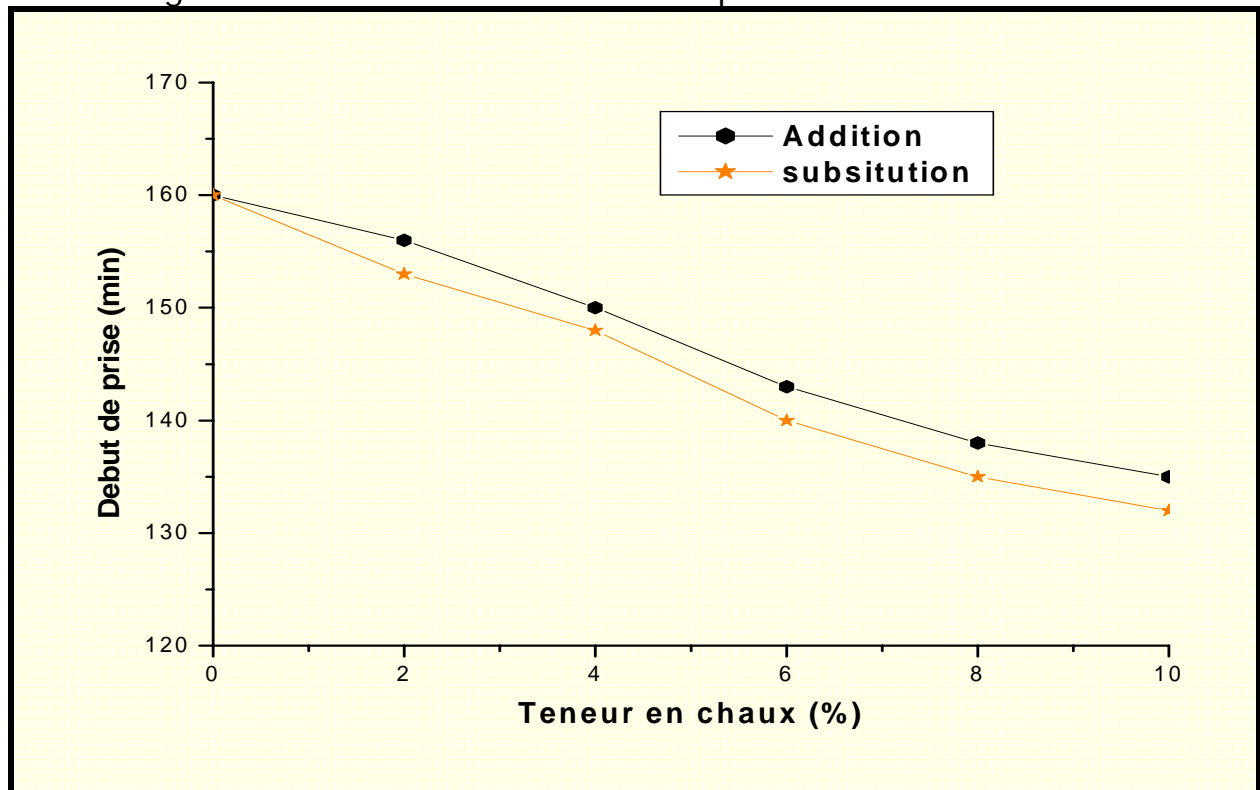


IV.2.4. Le temps de prise (début)

Tab. IV.4 : Evolution du début de prise des ciments étudiés

Activation	Poids des constituants de la pâte en (g)				La prise (Mn) début
	Cim	Chaux	Liant =cim+chaux	Eau	
CEM ₀₀	500	00,00	500	140	160
CEM ₊₂	500	10,00	510	143	156
CEM ₊₄	500	20,00	520	146	150
CEM ₊₆	500	30,00	530	149	143
CEM ₊₈	500	40,00	540	156	138
CEM ₊₁₀	500	50,00	550	160	135
CEM ₋₂	490	10,00	500	141	153
CEM ₋₄	480	20,00	500	143	148
CEM ₋₆	470	30,00	500	146	140
CEM ₋₈	460	40,00	500	148	135
CEM ₋₁₀	450	50,00	500	151	132

Figure. IV.3: Evolution du début de prise des ciments étudiés

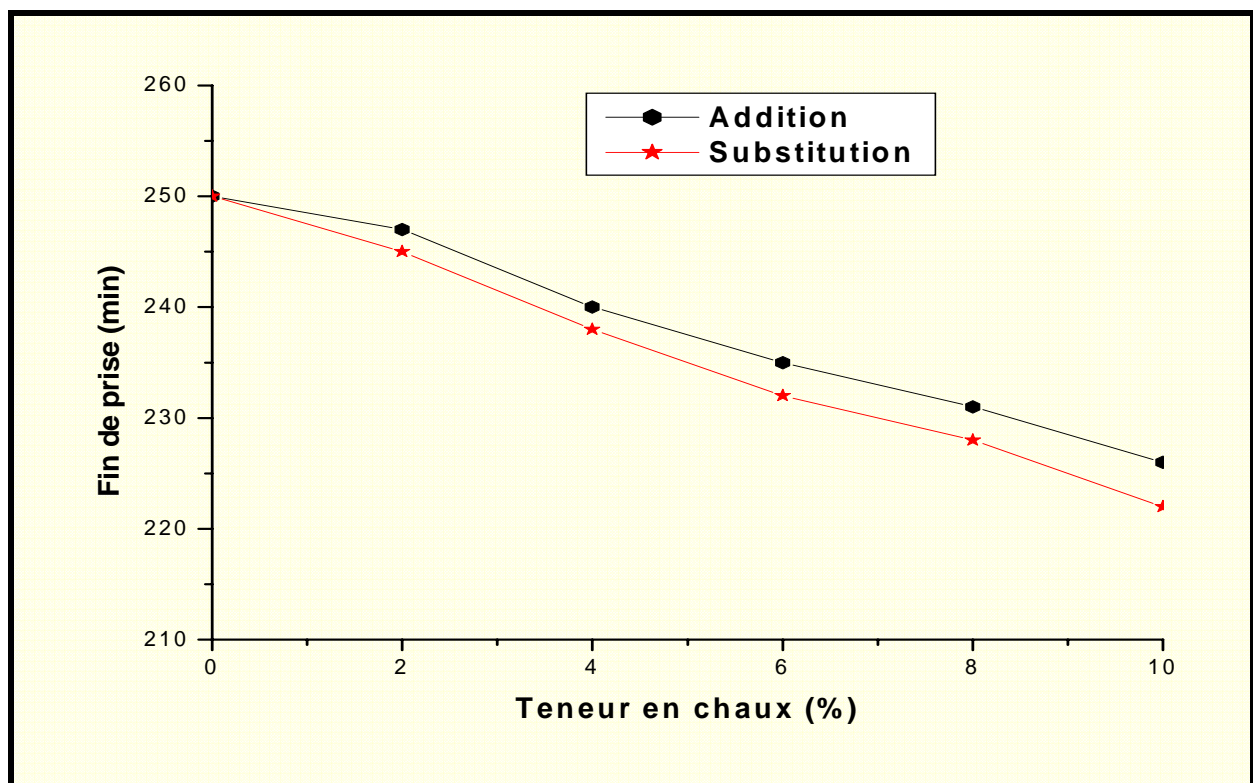


IV.2.5. Le temps de prise (fin)

Tab. IV.5 : Evolution de fin de prise des ciments étudiés

Activation	Poids des constituants de la pâte en (g)				La prise (Mn) fin
	Cim	Chaux	Liant = cim+chaux	Eau	
CEM ₀₀	500	00,00	500	140	250
CEM ₊₂	500	10,00	510	143	247
CEM ₊₄	500	20,00	520	146	240
CEM ₊₆	500	30,00	530	149	235
CEM ₊₈	500	40,00	540	156	231
CEM ₊₁₀	500	50,00	550	160	226
CEM ₋₂	490	10,00	500	141	245
CEM ₋₄	480	20,00	500	143	238
CEM ₋₆	470	30,00	500	146	232
CEM ₋₈	460	40,00	500	148	228
CEM ₋₁₀	450	50,00	500	151	222

Figure. IV.4: Evolution de fin de prise des ciments étudiés

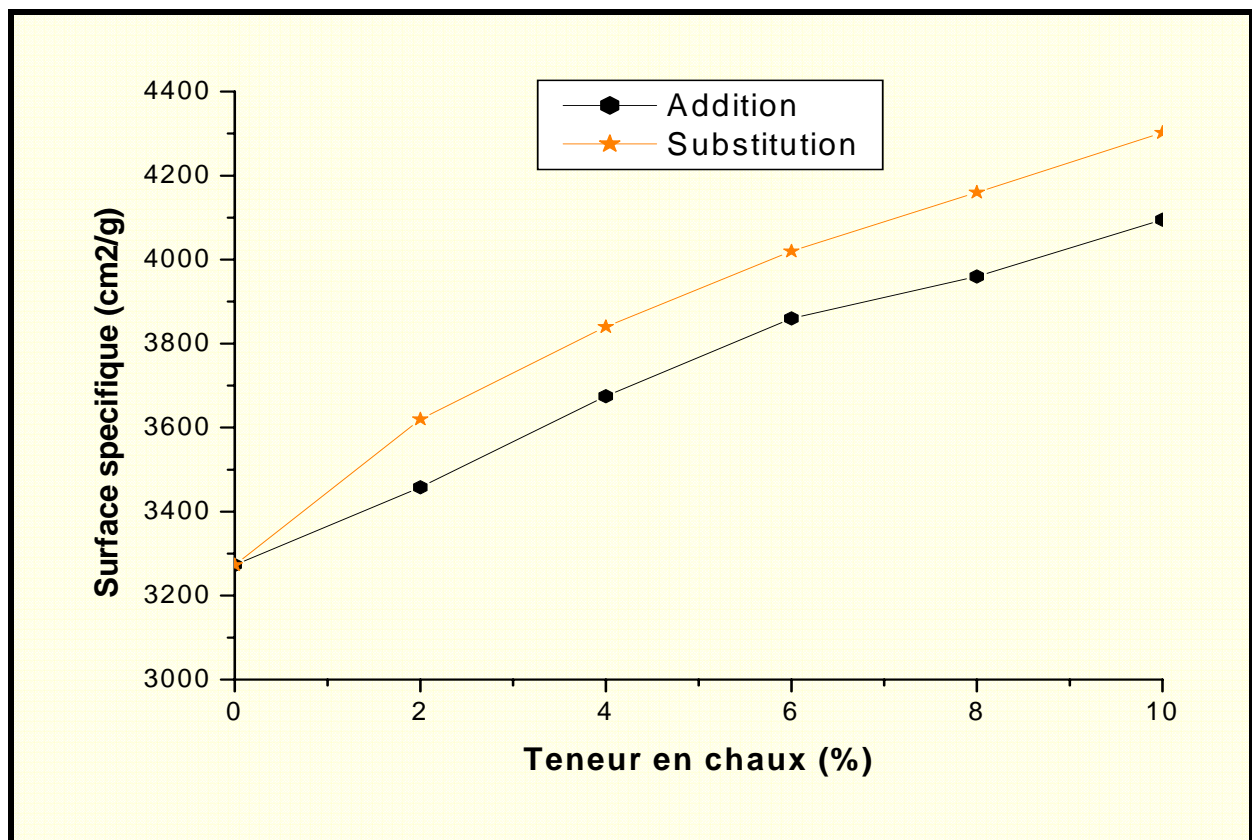


IV.2.6. La surface spécifique Blaine

Tab. IV.6 : Variation de la surface spécifique Blaine des ciments étudiés

Activation	SSB cm ² / g
CEM ₀₀	3273
CEM ₊₂	3458
CEM ₊₄	3675
CEM ₊₆	3860
CEM ₊₈	3960
CEM ₊₁₀	4095
CEM ₋₂	3620
CEM ₋₄	3840
CEM ₋₆	4020
CEM ₋₈	4160
CEM ₋₁₀	4302

Figure. IV.5 : Variation de la surface spécifique Blaine des ciments étudiés



IV.2.7. La granulométrie à laser

*La diffraction de laser est sensible au volume de la particule du ciment. Pour cette raison, des diamètres de particules sont calculés à partir du volume mesuré de la particule, mais assument une sphère de volume équivalent (méthode de mesure de volume ou mesure volumétrique).

* La mesure de la finesse par la méthode de Blaine (appareillage de perméabilité à l'air) représente toute la surface spécifique du ciment examiné (la méthode extérieure de mesure).

Ces deux méthodes ont quelques avantages et inconvénients en montrant la finesse (finesse de Blaine ou laser granulométrie) des ciments examinés.

Tab. IV.7 : Les paramètres de dimension des particules et la surface spécifique des onze ciments étudiés.

Types de ciments	D ₁₀ (µm)	Diamètre moyen D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	Surface spécifique S.S.B(cm ² /g)	
				finesse de Blaine	Diffraction Laser
CEM ₀₀	3,10	23,87	87,35	3273	10606
CEM ₊₂	2,15	18,34	79,68	3458	12424
CEM ₊₄	2,03	16,46	78,86	3675	13572
CEM ₊₆	1,81	15,28	77,16	3860	14140
CEM ₊₈	1,36	14,09	74,68	3960	15277
CEM ₊₁₀	1,04	11,02	72,37	4095	16236
CEM ₋₂	2,42	19,23	80,67	3620	13070
CEM ₋₄	2,37	17,33	79,61	3840	13935
CEM ₋₆	2,18	16,98	78,89	4020	14430
CEM ₋₈	1,89	14,59	75,32	4160	16392
CEM ₋₁₀	1,25	11,32	73,65	4302	18017

Figure. IV.6 : Distribution granulométrique des ciments étudiés(Addition)

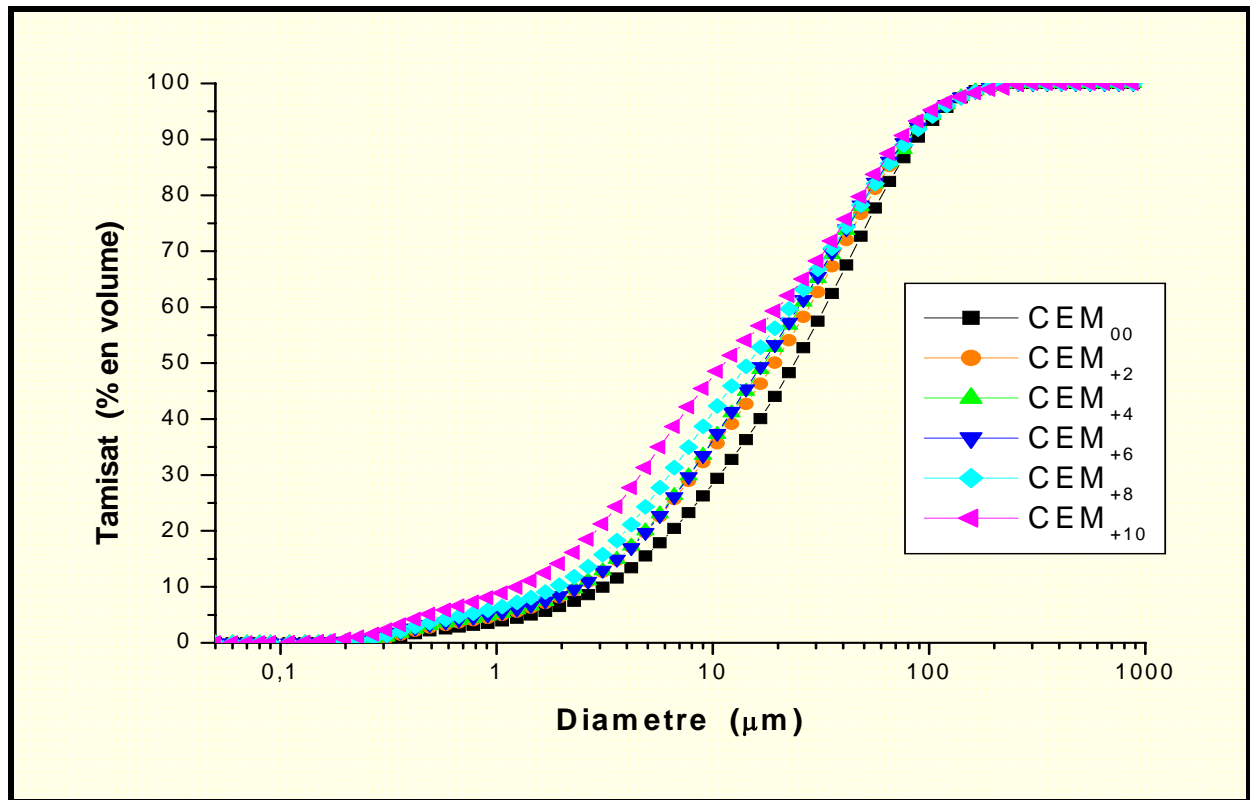
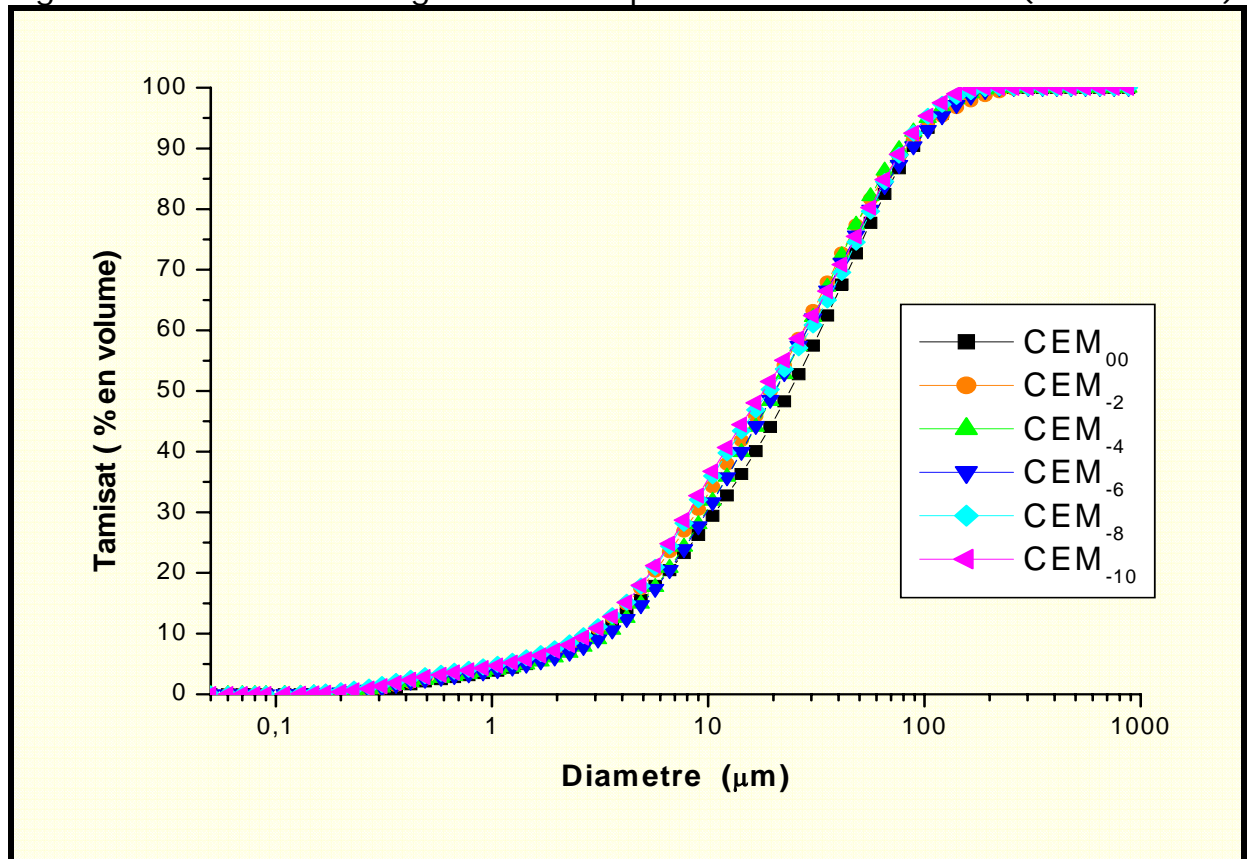


Figure. IV.7: Distribution granulométrique des ciments étudiés (substitution)

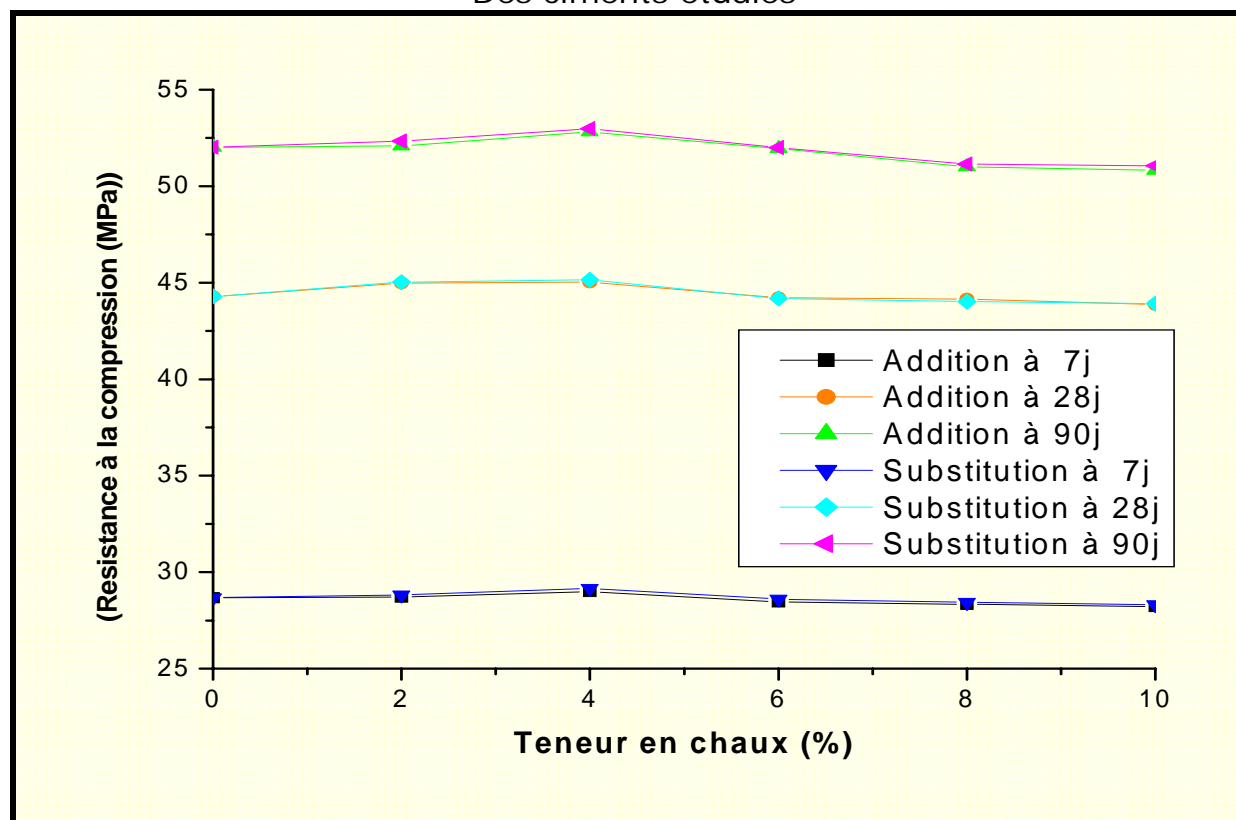


IV.2.8. La Resistance à la compression

Tab. IV.8 : Evolution de la Resistance a la compression des ciments étudiés

Activation	Constituants du mortier en (g)				Resistance a la compression (Mpa)		
	Sable	Ciment	Chaux	Liant	7J	28J	90J
CEM ₀₀	1350	450.0	0	450	28,68	44,28	52,02
CEM ₊₂	1350	450.0	9	459	28,71	44,98	52,08
CEM ₊₄	1350	450.0	18	468	29,00	45,02	52,81
CEM ₊₆	1350	450.0	27	477	28,45	44,22	51,95
CEM ₊₈	1350	450.0	36	486	28,34	44,16	51,01
CEM ₊₁₀	1350	450.0	45	495	28,21	43,86	50,83
CEM ₋₂	1350	441.0	9	450	28,83	45,02	52,34
CEM ₋₄	1350	432.0	18	450	29,16	45,14	52,98
CEM ₋₆	1350	4230	27	450	28,60	44,19	52,00
CEM ₋₈	1350	414.0	36	450	28,43	44,02	51,14
CEM ₋₁₀	1350	405.0	45	450	28,32	43,92	51,06

Figure. IV.8 : Evolution de la Resistance a la compression Des ciments étudiés

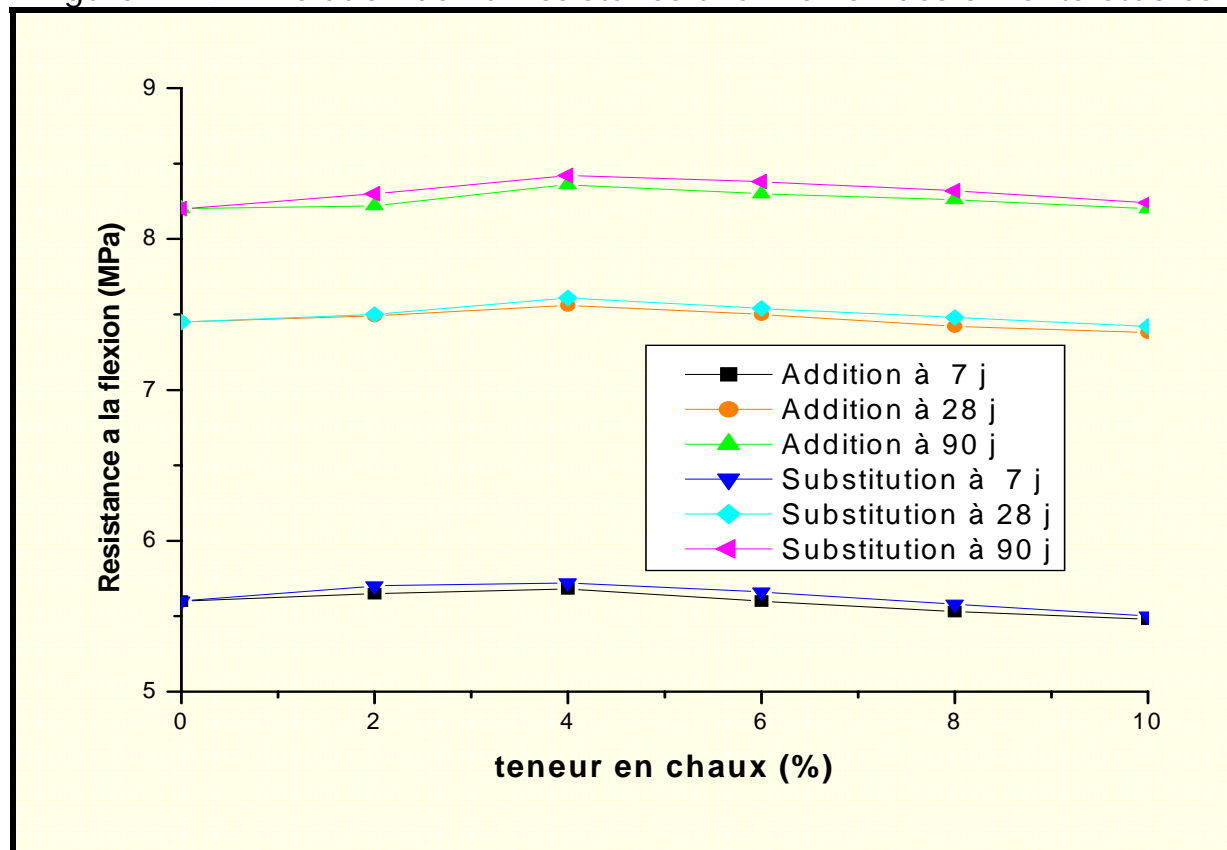


IV.2.9. La Resistance à la Flexion

Tab IV.9: Evolution de la Resistance a la flexion des ciments étudiés

Activation	Constituants du mortier en (g)				Resistance a la flexion (Mpa)		
	Sable	Cim	Chaux	Liant	7J	28J	90J
CEM ₀₀	1350	450.0	0	450	5,60	7,45	8,20
CEM ₊₂	1350	450.0	9	459	5,65	7,49	8,22
CEM ₊₄	1350	450.0	18	468	5,68	7,56	8,36
CEM ₊₆	1350	450.0	27	477	5,60	7,50	8,30
CEM ₊₈	1350	450.0	36	486	5,53	7,42	8,26
CEM ₊₁₀	1350	450.0	45	495	5,48	7,38	8,20
CEM ₋₂	1350	441.0	9	450	5,70	7,50	8,30
CEM ₋₄	1350	432.0	18	450	5,72	7,61	8,42
CEM ₋₆	1350	4230	27	450	5,66	7,54	8,38
CEM ₋₈	1350	414.0	36	450	5,58	7,48	8,32
CEM ₋₁₀	1350	405.0	45	450	5,50	7,42	8,24

Figure. IV.9: Evolution de la Resistance a la flexion des ciments étudiés

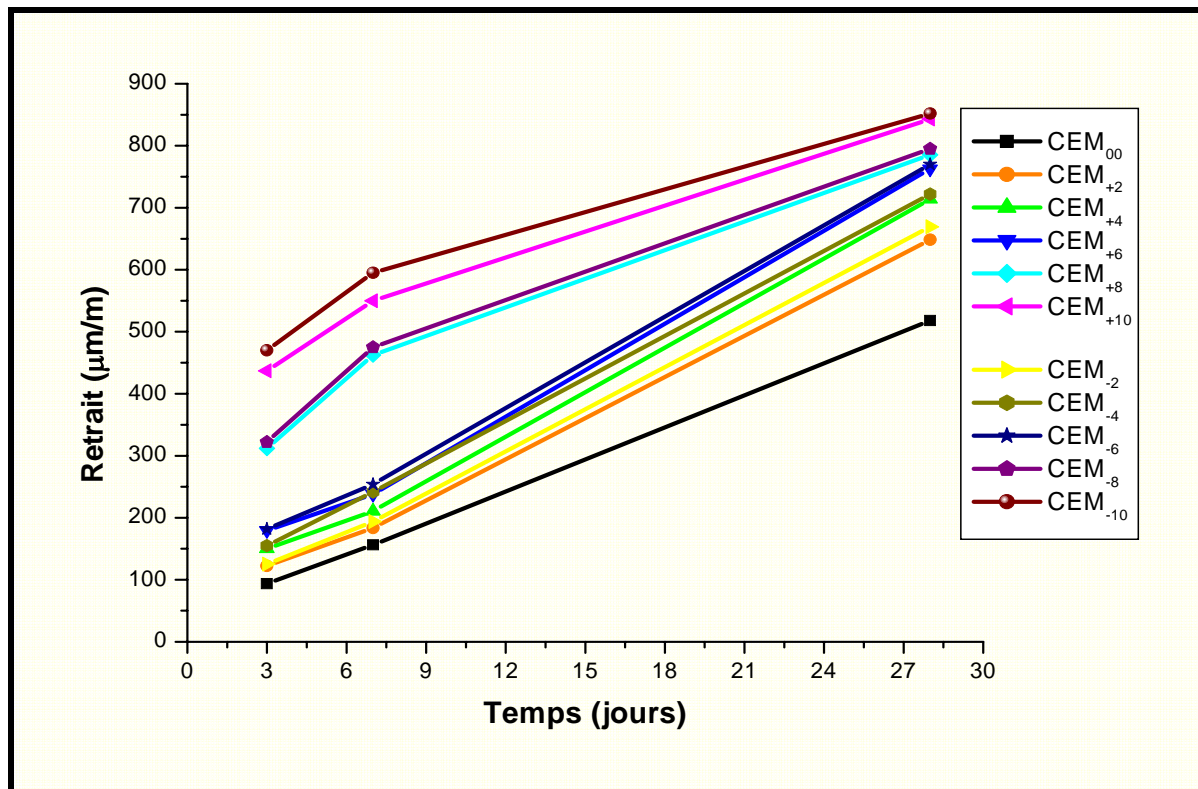


IV.2.10. Le retrait

Tab.IV.10: Evolution du retrait pour les ciments étudiés

Activation	Retrait en ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
	3J	7 J	28 J
CEM ₀₀	93,75	156,25	518,00
CEM ₊₂	122,36	183,50	648,30
CEM ₊₄	150,00	210,75	714,00
CEM ₊₆	179,58	238,00	762,64
CEM ₊₈	312,00	462,50	785,50
CEM ₊₁₀	437,00	550,00	843,00
CEM ₋₂	125,23	194,00	669,30
CEM ₋₄	155,00	241,75	722,00
CEM ₋₆	182,00	254,00	770,00
CEM ₋₈	322,00	475,00	795,00
CEM ₋₁₀	470,00	595,00	852,00

Figure. IV.10: Evolution du retrait pour les ciments étudiés

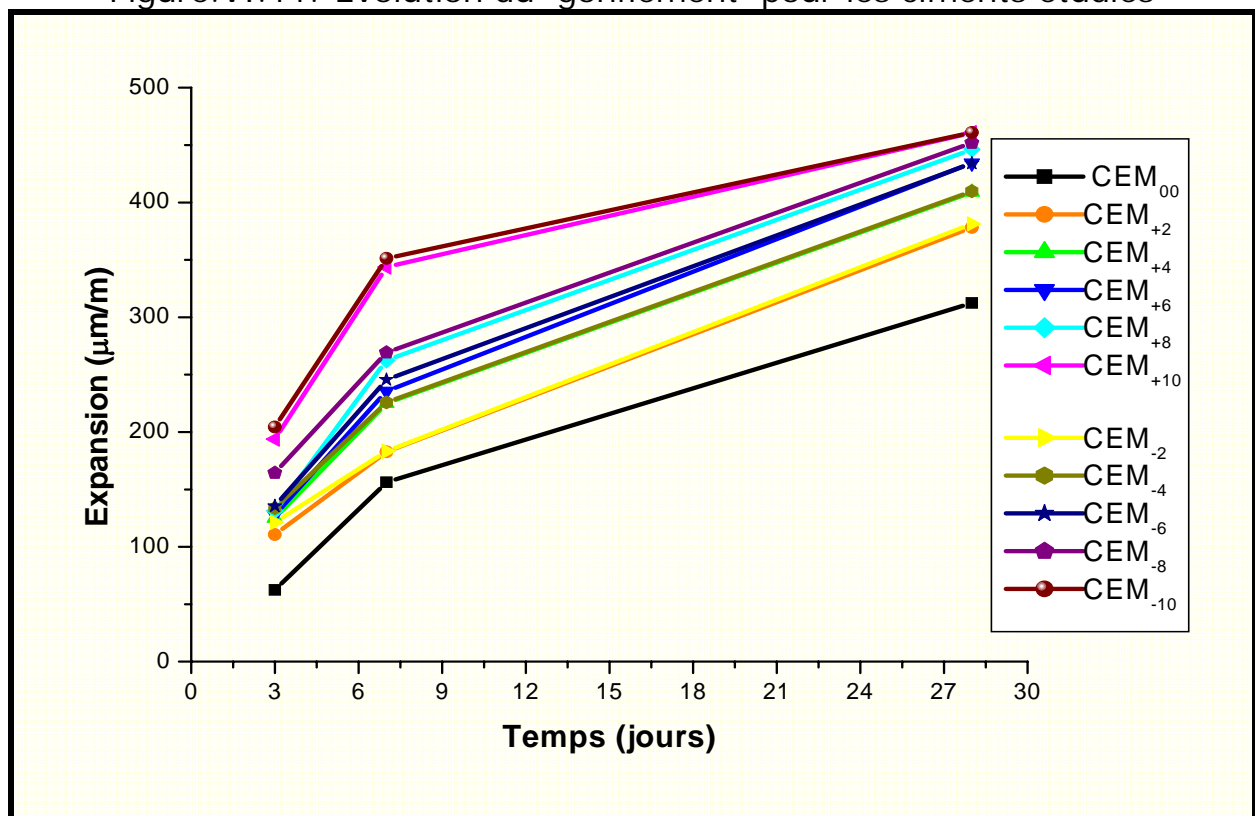


IV.2.11. Le gonflement

Tab VI.11: Evolution du gonflement pour les ciments étudiés

Activation	GONFLEMENT en ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
	3j	7j	28j
CEM ₀₀	62,5	156,25	312,5
CEM ₊₂	110,6	182,8	378,25
CEM ₊₄	125	225	409
CEM ₊₆	128	235,63	434,3
CEM ₊₈	131,25	262,5	446,25
CEM ₊₁₀	193,75	343,75	460,75
CEM ₋₂	121,24	183,25	381,32
CEM ₋₄	133,64	225,8	409,8
CEM ₋₆	135,62	245,64	434,15
CEM ₋₈	164,5	269,35	452
CEM ₋₁₀	204,39	351,3	461

Figure.VI.11: Evolution du gonflement pour les ciments étudiés



IV.3. INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS

IV.3.1 : Effet de l'activant minéral (chaux hydratée) sur le poids spécifique et la surface spécifique de Blaine (S.S.B)

❖ La figure IV.1 présente l'effet de l'activant minéral sur le poids spécifique des ciments étudiés. D'après les résultats obtenus (figure IV.1), on remarque que la variation de la teneur ou pourcentage de l'activant minéral par addition ou par substitution a un effet significatif sur le poids spécifique.

La différence observée entre les valeurs des poids spécifiques des ciments activés, dépend de la teneur de l'activant minéral incorporé dans le ciment (finesse élevée de l'activant minéral).

❖ La figure IV.5 montre l'effet de l'activant minéral sur la surface spécifique de Blaine (S.S.B) des poudres de ciments étudiés. La méthode d'activation du ciment au laitier par la chaux hydratée influe considérablement sur la surface spécifique (finesse) des ciments étudiés. L'augmentation du pourcentage de l'activant minéral par diverses méthodes (substitution et addition) par rapport au poids du ciment au laitier augmente la surface spécifique du ciment (variation de la porosité du ciment). La différence observée entre les surfaces spécifiques des ciments activés, dépend du pourcentage de l'activant minéral incorporé dans le ciment (surface spécifique élevée de l'activant minéral).

IV.3.2 : Influence de l'activant minéral (chaux hydratée) sur la consistance et les délais de prise des ciments étudiés

❖ La figure IV.2 présente l'effet de l'activant minéral sur la consistance normale de la pâte de ciment. La demande ou besoin en eau est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat (essai de Vicat standard). L'influence de l'activant minéral sur la pâte de ciment est exprimée par les changements de la consistance normale (rapport de la demande en eau). On note également que la granulométrie du ciment (surface spécifique) a une influence significative sur la consistance normale de la pâte de ciment (rapport de la demande en eau), ceci se traduit par l'augmentation de la surface de mouillage des particules quand le ciment présente une forte finesse (surface spécifique élevée).

❖ Les figures IV.3 et IV.4 montrent l'effet de l'activant minéral sur les délais de prise (début et fin) des pâtes de ciment testées. On remarque que l'augmentation de l'activant minéral (accélérateur de prise) diminuent les délais ou temps de prise (début et fin de prise), ceci est dû principalement à la forte finesse de la chaux hydratée.

Généralement la période de prise de la pâte de ciment se raccourcit avec l'augmentation de la finesse des ciments étudiés (finesse très élevée de chaux hydratée). Cela est expliqué par le fait que la réactivité pouzzolanique est accélérée à court terme. La cinétique de l'hydratation devient de plus en

plus rapide avec l'augmentation de la finesse de Blaine (surface spécifique) du ciment.

En effet, les particules très fines adhèrent aux autres et activent le phénomène de prise de la pâte de ciment. Ainsi l'effet de la grande surface spécifique de Blaine sur l'accélération de l'activité pouzzolanique réagit avec l'hydroxide de calcium [Ca(OH)₂, Portlandite] en cristaux de gel de la forme C-S-H.

La réaction pouzzolanique est : $[Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow C-S-H]$.

IV.3.3 : Influence de l'activant minéral (chaux hydratée) sur la finesse et la distribution granulométrique des grains de ciments

Les résultats obtenus concernant les finesses des onze ciments étudiés ont été déterminés par le Perméabilimètre de Blaine et le Granulomètre à laser. La taille des particules de onze ciments étudiés est indiquée par les figures. IV.6 et IV.7.

Les principaux paramètres qui caractérisent la distribution de la taille des particules et la surface spécifique de Blaine sont présentés dans le tableau IV.7. L'augmentation du pourcentage de l'activant minéral (chaux hydratée) provoque deux phénomènes importants:

(a) une diminution de la taille des particules et (b) une variation du volume total des pores.

La différence observée entre les courbes obtenues (figures. IV.6 et IV.7) est due à l'agglomération des particules. La différence observée entre les valeurs de la surface spécifique obtenue par le Perméabilimètre de Blaine (Appareil de Perméabilité à l'air) et celle obtenue par le Granulomètre à laser (Tableau. IV.7), peut être due essentiellement à :

* La diffraction à laser est sensible au volume de la particule de ciment (mesure en volume ou méthode volumétrique).

* La mesure de la finesse par la méthode de Blaine (Perméabilité à l'air de Blaine) représente la totalité de la surface spécifique du ciment testé (mesure surfacique ou pondérale).

IV.3.4 : Influence de l'activant minéral (chaux hydratée) sur le retrait et le gonflement.

❖ La variation du retrait et du gonflement en fonction de l'activant minéral (chaux hydratée) est présentée par les figures IV.10 et IV.11.

Les remarques principales observées pour les onze ciments étudiés sont :

- ✓ Augmentation du retrait et du gonflement pendant la période du durcissement (3, 7 et 28 jours).
- ✓ Augmentation du retrait et du gonflement avec la variation du pourcentage de l'activant minéral (chaux hydratée).

L'évolution ou changement du retrait et du gonflement avec la variation du pourcentage de l'activant minéral (chaux hydratée) est essentiellement due à la présence d'une porosité capillaire élevée. Dans ce cas la cinétique de la réaction d'hydratation devient rapide à l'intérieur de la pâte du ciment.

IV.3.5 : Influence de l'activant minéral (chaux hydratée) sur les résistances mécanique à la compression et à la flexion du mortier testé

- ❖ Les évolutions des résistances mécaniques (compression et flexion) des mortiers testés sont présentés par les figures IV.8 et IV.9.

Les résistances mécaniques (compression et flexion) augmentent en fonction de l'âge de durcissement. Cela peut être dû à la variation de la cinétique d'hydratation du minéral C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bicalcique). Ces derniers sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et à moyen terme.

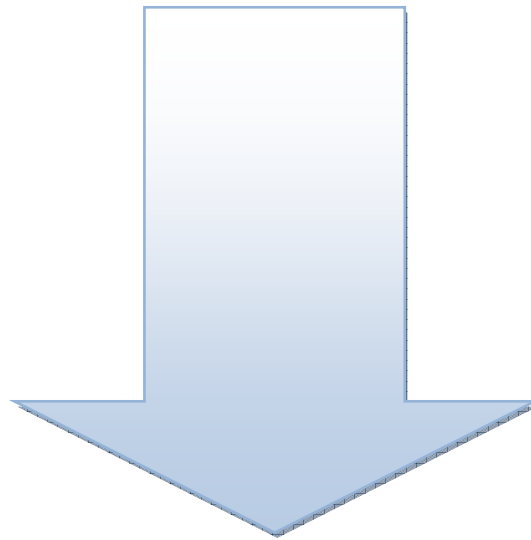
La méthode d'activation du ciment par l'activant minéral améliore clairement les performances mécaniques du mortier. Ceci confirme le rôle joué par la granulométrie de l'activation minérale sur l'hydratation du ciment activé. La réaction d'hydratation du ciment activé devient rapide et complète (formation du $Ca(OH)_2$ libéré pendant l'hydratation du ciment). Cette réaction pouzzolanique participe à la formation d'un deuxième C-S-H supplémentaire. Par conséquent la faiblesse des résistances à court terme peut être compensée par activation du ciment (augmentation de la finesse du ciment activé par la chaux hydratée).

L'augmentation des réponses mécaniques en fonction de la variation de la finesse (activation minérale) croit d'une manière différente d'un ciment à un autre, ceci dépend du pourcentage de l'activateur minéral (réactivité du mélange) incorporé dans le ciment.

Ainsi, on peut conclure que la finesse du ciment activée est une caractéristique significative : pendant l'hydratation du mélange, plus les particules sont très fines, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète (variation des temps de prise).

CHAPITRE .V

CONCLUSION ET PERSPECTIVES



- V.1. Conclusion générale
- V.2. Perspectives

V.1.CONCLUSION GENERALE

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

✓ Augmentation du besoin en eau (quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale) avec la variation du pourcentage de l'activant minéral (chaux hydratée).

✓ Influence significative de la teneur en chaux sur la demande en eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment activé, cela est due au fait que la surface de mouillage augmente au fur et à mesure que le ciment est activé (ciment + chaux) par la présence d'une forte teneur en CaO.

✓ Accélération des délais ou temps de prise (début et fin) du liant hydraulique activé (ciment + activant), cela s'explique par le fait que la réaction chimique est accélérée, ce qui veut dire que la cinétique d'hydratation du ciment activé devient de plus en plus rapide en fonction de la variation de l'activant minéral (formation élevée des cristaux de CSH : élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte du ciment confectionné).

✓ Evolution du retrait et du gonflement avec la variation du pourcentage de l'activant minéral (chaux hydratée), ceci est due essentiellement à la présence d'une porosité capillaire élevée. Dans ce cas la cinétique de la réaction d'hydratation devient rapide à l'intérieur de la pâte du ciment.

✓ l'activation minérale (finesse très élevée de la chaux hydratée) du ciment au laitier (hydraulicité latente) présente deux avantages essentiels :

- Haute résistance mécanique du mortier ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée pendant le période de durcissement initial (à court terme). Ceci est dû à la finesse élevée de la chaux hydratée et au pourcentage d'hydroxyde de calcium dans le ciment activé, qui accélère le processus d'hydratation, en assurant une prise rapide.

- La méthode d'activation du ciment du laitier (hydraulicité latente) par l'activant minéral accélère le processus d'hydratation et réduit les temps de prise du ciment activé.

On peut conclure que l'activation du ciment au laitier par la chaux fine (activant minéral) par substitution ou par addition a un effet significatif sur les résistances mécaniques (compression et flexion). Le pourcentage optimum de l'activant minéral (chaux hydratée) varie de 2 à 4%. Au delà de 6 à 10% du pourcentage de l'activant minéral, la résistance mécanique du mortier testé diminue.

En conclusion finale de ce travail, nous pouvons dire que la technique d'activation proposée est une méthode simple, rapide, économique et performante du point de vue résistance mécanique du matériau testé.

V.2.PERSPECTIVES (FUTURS TRAVAUX)

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de l'activant minéral (chaux hydratée) du ciment au laitier (hydraulicité latente) sur les propriétés physico-chimiques du ciment utilisé et le comportement mécanique (résistances à la compression et à la flexion) du mortier testé.

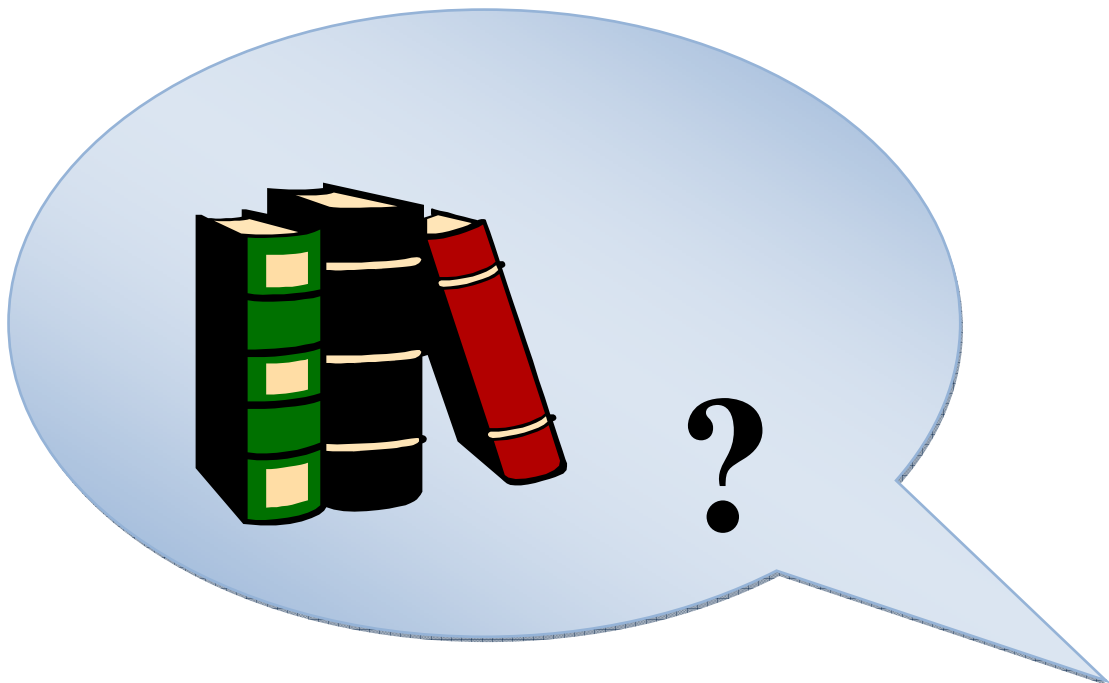
Ce travail présente une analyse expérimentale à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du ciment au laitier et la réponse mécanique du mortier en utilisant un activant d'origine minérale (agent d'activation de prise).

L'intérêt de cette étude expérimentale consiste à rechercher, en utilisant la technique d'activation du ciment au laitier par un activant minéral (chaux fine) les meilleurs résistances mécaniques du mortier.

En perspective, nous proposons les axes de recherches suivants :

- 1- Effets des méthodes d'activation (chimique, mécanique et thermique) sur les caractéristiques physico-chimiques, thermique et mécaniques des ciments aux ajouts minéraux.
- 2- Effet de l'activation des ajouts minéraux (laitier, pouzzolane, etc ...) par le gypsonat sur les caractéristiques du mortier et du béton.
- 3- Effet de l'activation des ajouts pouzzolaniques et des ciments aux additions minérales par la chaux fine sur la durabilité des matériaux cimentaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Dr.GHOMARI.FOUAD, Science des matériaux de construction, Université Aboubaker Belkaid, Faculté des Sciences département génie civil, (2006)
- [2]. COMITE DE DIRECTION DE HOLCIM (Suisse), les ciments, producteur de matériaux de construction sur le plan mondial, disponible sur site web <<http://www.holcim.com>> (Consulté le 10/06/2006)
- [3]. L.BOUALEM, DOC LABORATOIRE CIMENTRIE HADJAR-SOUD, le ciment portland, (2004)
- [4]. SOTACIB, TUNISIAN-ANDALUSIAN-COMPANY, White ciment disponible sur site web <<http://www.sotacib.com>> (Consulté le 10/06/2006)
- [5]. COURS EN LIGNE, Matériaux de construction, Les ciments, Chapitre 2, Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org/>>, (Consulté le 06/09/2006)
- [6]. UNIVERSITE DE CHERBROUK, Les ajouts dans le ciment- GCI 712 Chap. 7 page 26.32.39, disponible sur site web <http://www.usherbrooke.ca/recherche/en_cours/genie_chimique/Genie> (Consulté le . 10/06/02007)
- [7]. OLYMPIADE DE CHIMIE, chimie des ciments , disponible sur site web <<http://www.ping.be/ping6998/olympiade.htm>> (Consulté le.10/06/02007)
- [8]. WIKIPEDIA L'ENCYCLOPEDIE LIBRE, Un article sur le ciment, disponible sur site web <<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>> (Consulté le 11/06/02007)
- [9]. ITALCEMENTI GROUP, Ciments Calcia, disponible sur site web <<http://www.ciments-calcia.fr/pro/pdf/labelhrc.pdf>> (Consulté le 2/04/2006)
- [10]. DAMIEN DEMAILLY, LES enjeux du développement durable au sein de l'Industrie du Ciment réduction des émissions de CO2, Rapport Final Octobre 2005 - Février 2006.

-
- [11]. SOCIETE FRANÇAISE DE CHIMIE , Rapports annuels des Ciments Français,Cimenteries françaises , Rapport 2005, disponible sur site web <<http://www.sfc.fr/donnees/mater/ciments/texcim.htm>> (Consulté le 10/06/2007).
- [12]. HUGUETTE BRUNET, GOVERNMENT OF CANADA, Ajouts cimentaires Date Published: 2003-10-24, disponible sur site web <<http://scm.gc.ca/indexf.html> >, (Consulté le 12/04/2006)
- [13]. ASSOCIATION FRANÇAISE DE LA CONNAISSANCE ET DE L'APPLICATION DES NORMES, Actualité technologique et scientifique, Les ciments, disponible sur site web <<http://www.techno-science.net/>> (Consulté le 12/04/2006)
- [14]. THE CEMENT ASSOCIATION OF CANADA, les ciments avec ajouts disponible sur site web <<http://www.cement.ca/cement.nsf>> (Consulté le 10/06/2007)
- [15]. CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET CES APPLICATION « Fiche techniques: le ciment et ces application», collection Cimbeton, paris 1997.
- [16]. F.ROUESSAC & A.ROUESSAC, « analyse chimique : méthodes et techniques instrumentales modernes »,4^{ème} Edition, Dunod, Paris, 1998
- [17]. PIERRE CHAUFOUR, La Chaux (histoire-fabrication propriétés), disponible sur site web <la-chaux.net > (consulte le 30/11/2004)
- [18]. PIERRE-CLAUDE AITCINE, Béton de haute performance, Edition Eyrolles 2001, pp, 134 :171,175 :193.
- [19]. NASR-EDDIN KEDJOUR, laboratoire du béton, office de publication universitaire 2003
- [20]. R.DUPAIN, R.LANCHON,J-C.SAINT ARROMAN, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition casteilla2004 PP,17-25

-
- [22]. A.LAFUMA, chimie appliquée aux matériaux de construction, Masson et Cie Editeurs, pp 18,22,34
- [23]. ECOLE D'AVIGNON, technique et pratique de la chaux, Eddition eyrolles 2000 , pp,27-43.
- [24]. ADAMM-NEVILLE, Propriétés des bétons ,Eddition eyrolles2000, pp 7,9,10.
- [25]. MICHEL VENANT , ciment et bétons, 2^{ème} édition 1973,pp,15,21,34
- [26]. GEORGE DREUX, JEANFESTA ,nouveau guide du béton et de ses constituants, Eddition eyrolles 1998 ,pp,8 :20.
- [27]. PROFESSEUR: TAGNIT- AREZKI , « Ajout dans le ciment », GCI 712 cours 2003, Chapitre 7
- [28]. SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET ARCHITECTES, Norme SIA 215 , « liant minéraux », ,zurich 1978
- [29]. DEGUSSA.EVONIK, Press forum, Process Technology & Engineering, disponible sur site web
<<http://as.degussa-cc.ch/dictionary/French/lexicon/hochl.htm>.>
(Consulte le 06/09/2006)
- [30]. ANISSA BESSA, « Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité
- [31]. ASHBY M.F, JONES D.R.H, « Matériaux.2 », Dunod, édition 1991.
- [32]. ELKEM MICROSILICA FOR SUPERIOR CONCRETE, «How to improve strength
- [33]. KOBAYASHI K, UNO Y, « Influence of alkali on carbonation of concrete, 2. Influence
- [34]. ARYA C, Buenfeld N.R and Newman J.B, « Factors influencing chloride-binding in
- [35]. BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur

-
- [36]. GROUPE CIMENTS LUXEMBOURGEOIS, Séminaire – BETON 2001: Journée d'information technique 23 novembre 2001 Carlo KIRPACH
- [37]. LABORATOIRE CIMENTS CETIM. BOUMERDES , disponible sur site web < <http://www.cetim-dz.com/bull12.pdf> >, (consulte le 10/06/2007)
- [38]. « LABORATOIRE MATERIAUX CEBTP - SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE ” Annexe technique I à la convention d'accréditation N° 1-0002 du 01/02/2006 , accrédité par la Section Laboratoires du COFRAC pour son unité technique
- [39]. BERATEST AG SUISSE/SWITZERLAND, Ciment Mortier, disponible sur site web <<http://www.beratest.com/catalog/francais/pdf/0060.pdf>> (Consulté le 10/06/2006)
- [40]. R.CHABOUNI ET A.CHARRA, la granulométrie a laser , service sédimentologie , centre de développement et de recherche de la sonatrach , C.R.D. BOUMERDESS,2007
- [41]. BARON. J, OLLIVIER J.P, « La durabilité des béton », Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
- [42]. BIDJOCKA C, TUSSET J, MESSI A, PERRA J, (1993), « Etude et évaluation de l'activité pouzzolanique des pouzzolanes de Djoungo (Cameroun) », Ann. Fac. Sc. HSI, Chimie et Sciences de la Terre, PP. 133-145.
- [43]. MEASON M,(1981),« Etude de l'activité pouzzolanique des Matériaux naturels et traités thermiquement en vue de la réalisation des liants hydrauliques »,Thèse Doct.Université Paul Sabatier, Toulouse,PP.133-145.
- [44]. MILLER E. W, « Blended cements - Applications and implications », Cément andConcrete Composites, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.
- [45]. BUCHNER W, SCHILIEBS R, WINTER G, BUCHEL K.H, (1989), « Industrial Inorganic Chemistry », VCH, PP. 370-399.
- [46]. BAI J, CHAIPANICH KINUTHIA J. M, O'FARRELL M, SABIR B.B, WILD S.LEWIS M.A, (2003), «Compressive strength an hydratation of waste paper
-

sludge ash ground granulated blast furnace slag blended paste », *Cément and Concrete Research* 33, PP.1189-1202.

[47]. F. GABRYSIK – Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.

[48]. *l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage* * CEMENT ASSOCIATION OF CANADA * Par Norman F. MacLeod, ing. Mars 2005 page 10-12

[49]. DOCUMENTS, « Pechiney Électrométallurgie », Tour Manhattan, Cedex 21, 92087 Paris la Défense.

[50]. REALISATION ASSOCIATION GEOLOGIQUE D'ALES ET DE SA REGION (AGAR), Utilisation du calcaire,

[51]. These An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, *Canadian Journal of Civil Engineering* ./ Caijun Shi / *Rev. can. génie civ.* 28(5): 778-786 (2001)

[52]. *Rev. Future. sciences ,matériaux de construction*, disponible sur site <<http://www.futura-ciencs.com/fr/comprendre/glossaire/definition/t/terre>> (Consulte le 06/09/2006)

[53]. BOYNTON, ROBERT S. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.

[54]. STEPHANE VOITCHOVSKY , GILLES MEGEVET, *décoration historique de la chaux* , disponible sur site web <<http://www.voi.ch/historique/historique.pdf>> ,(Consulté le 11/06/2006)

[55]. Pierre Chaufour, *Les utilisation de la chaux*, disponible sur site web <<http://members.aol.com/pierrotbj/private/utilisations.pdf>> (Consulté le 11/06/2006)

[56]. ADAPTATION ELECTRONIQUE DU DOCUMENT EUROPEEN CONCERNANT LES MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES, BREF DU CIMENT ET DE LA CHAUX, disponible sur site web <http://aida.ineris.fr/bref/bref_ciment/site/pages/francais/bref_chaux >

-
- [57]. BAKKER. REM, « permeability of blended cément concretes »
Paper SP-79-30 from ACI sp 79, Detroit 1983, PP. 589-605.
- [58]. Groupe Eyrolles SA ,ciment Portland compose, Editions Eyrolles
2007 , <http://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.htm>
- [59]. AMINE N, « Incidence de l'adjonction de la pouzzolane sur les
propriétés des bétons de haut résistance », Mémoire d'ingéniorat,
Boumerdes 1998.
- [60]. . BYFORS K, « Influence of silica fume and flyash on chloride
diffusion and PH values in cément paste », Cem. Concr. Res, 1987, 17, 1,
115-130.
- [61]. MIDGLEY H.G. AND ILLSTON J.M, « The penetration of chlorides into
hardened -cément pastes, Cem, Concr, Res », 1984, 14, 4, 546-558.
- [62]. GALAL A, TAHA A.S, HELMY I.M, «Rice husk ash in Portland blended
cément », Silicates industriels, Nr. 1-2, PP. 55-58, 1990.
- [63]. BIJEN J. PROF. DR, «Blast furnance slag ciment », 1996.
- [64]. MEZGHICHE. B, « Résistance et déformabilité de Béton Basique »,
Premier séminaire national en génie civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.
- [65]. VORNOVITCH L. V, DRON R, «Action des différents activants sur
l'hydratation du laitier granulé », bull. Liaison Labo. P. ET Ch -83 – mai-juin
1975 – Réf. 1810.
- [66]. REVUE DE LA DOCUMENTATION,UNIVERSITE LAVAL , Hydratation
du ciment Portland, Collection Mémoires et thèses électroniques
<http://www.theses.ulaval.ca/2006/23642/ch02.html>
- [67]. INSA RENNES, GRGC RENNES EA 3217 LABORATOIRE MATERIAUX,
Activité des laitiers de haut fourneau en ajout aux ciments Portland
- [68]. OLIVIER BONNEAU, Procédés et techniques de fabrication du ciment
,Disponible sur site web
<http://aida.ineris.fr/bref/bref_ciment/site/pages/francais/bref_ciment>
(Consulté 06/09/2006)
-

[69]. A.ADJTOUTAH-PDG du CETIM, Info cetim , Utilisation de la chaux pour les sols et les bétons bitumineux ,thème extrait de la communication présentée par M. ADJTOUTAH à l'occasion des ateliers de l'USTHB, , octobre 2005.

[70]. S.BOUALLLEG ET D.LAADJALI, Effet de l'activation du ciment sur la résistance mécanique du mortier, Mémoire de fin d'étude, U.M'sila, juin 2001

INDEXE



I. INDEXE DES TABLEAUX

II. INDEXE DES FIGURES

II. INDEXE DES PHOTOS

I.INDEXE DES TABLEAUX

INTITULEE	PAGE
CHAPITRE.I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
Tab. I.1. classement des roches	5
Tab. I.2. Les impuretés nuisibles les plus rencontrées sont	7
Tab. I.3. Influence Des Eléments mineurs sur le ciment	7
Tab. I.4. La composition chimique du Ciment "cru"	8
Tab. I.5. Enthalpie des réactions de formation et de décomposition	12
Tab. I.6. Les principaux minéraux que renfermer le ciment portland	13
Tab. I.7. Composition chimique du clinker	15
Tab. I.8. Calcul de la composition minéralogique du clinker	17
Tab. I.9. Composition minéralogique de clinker	18
Tab. I.10. La chaleur d'hydratation	23
Tab. I.11. Classification des ajouts selon leur réactivité, d'après	32
Tab. I.12. Les constituants des ciments courants	33
Tab. I.13. Les constituants admis dans les 5 types de ciments	33
Tab. I.14. la composition chimique moyenne du laitier	39
Tab. I.15. Les 5 types de ciments courants et leur composition	52
Tab. I.16. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe	52
Tab. I.17. Limite des classes et sous classes de résistances	53
Tab .I.18. Exigences chimiques	53
Tab. I.19. Le cycle de la chaux	58
Tab. I.20. famille de chaux en fonction du volume d'eau absorbé	61
Tab. I.21. Composition chimique de la chaux et de ses constituants	63
Tab. I.22. Solubilité de la chaux en fonction de la température	64
Tab. I.23. Les surfaces spécifiques suivantes de différents	65
Tab. I.24. La masse volumique Apparente De différents Type de chaux.	65
Tab. I.25. le poids spécifique des différents Type de chaux	65
Tab. I.26. différences chimiques des liants	67
Tab. I.27. Chaux ou ciment de la cuisson a la mise en sac	67
Tab. I.28. Les normes, Tableau récapitulatif	68

CHAPITRE.II. METHODES D'ESSAIS	
Tab. II.1. Activation par addition	74
Tab. II.2. Activation par substitution	74
Tab. II.3. Méthodes d'essais et normes	76
Tab. II.4. Méthodes d'essais et lieux de réalisation	77
Tab. II.5. Dimensions nominales des tamis	89
Tab. II.6. limites de temps	96
CHAPITRE.III. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	
Tab.III.1. Composition chimique de la chaux hydratée utilisée	101
Tab.III.2. Caractéristiques de la chaux hydratée	101
Tab.III.3. Constituants minéraux du ciment étudié	102
Tab.III.4. Composition chimique des matières premières utilisées	102
Tab.III.5. Composition chimique du clinker utilise	102
Tab.III.6. Composition chimique des ajouts utilises	103
Tab.III.7. Composition chimique du ciment utilise	103
Tab.III.8. Caractéristiques physiques du ciment utilise	103
Tab.III.9. Composition chimique du sable de dune utilisé	104
Tab.III.10. Caractéristiques physiques du sable de dune utilisé	104
Tab.III.11. Analyse granulométrique du sable	105
Tab.III.12. Analyse chimique et minéralogique de l'eau de gâchage	106
CHAPITRE.IV. RESULTATS ET INTERPRETATION	
Tab. IV.1. Compositions chimiques des ciments étudiés	108
Tab. IV.2. Variation de la masse volumique absolue des ciments	109
Tab. IV.3. Variation de la consistance normale des ciments étudiés	110
Tab. IV.4. Evolution du début de prise des ciments étudiés	111
Tab. IV.5. Evolution de fin de prise des ciments étudiés	112
Tab. IV.6. Variation de la surface spécifique Blaine des ciments	113
Tab. IV.7. Les dimensions des particules et la surface Blaine	114
Tab. IV.8. Evolution de la Resistance a la compression des ciments	116
Tab. IV.9. Evolution de la Resistance a la flexion des ciments	117
Tab. IV.10. Evolution du retrait pour les ciments étudiés	118
Tab. VI.11. Evolution du gonflement pour les ciments étudiés	119

II.INDEXE DES FIGURES

INTITULEE	PAGE
CHAPITRE.I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
Fig. I.1. Stades de fabrication du ciment.	4
Fig. I.2. Le Schéma de la fabrication du ciment.	10
Fig. I.3. Cheminement dans le four	11
Fig. I.4. Processus de fabrication du ciment	14
Fig. I.5. Cristaux anhydres du clinker	15
Fig. I.6. Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie De clinker	16
Fig. I.7. Les phases de l'hydratation	22
Fig. I.8. Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment	24
Fig. I.9. Micrographies de l'ettringite	28
Fig. I.10. Les hydrates	29
Fig. I.11. Observations au MEB de la pâte de ciment CHF	29
Fig. I.12. Cendre volante	35
Fig. I.13. Cendre volante	35
Fig. I.14. Formation des cendres volantes	35
Fig. I.15. DRX d'une cendre volante	36
Fig. I.16. Laitier	37
Fig. I.17. DRX de deux différents laitiers	40
Fig. I.18. DRX de deux différentes fumées de silice	40
Fig. I.19. Le diagramme de Rankin	46
Fig. I.20. Diagramme calcite-dolomite-magnésite	55
Fig. I.21. Four à chaux La ville à Montluçon	57
CHAPITRE.II. METHODES D'ESSAIS	
Fig. II.1. Principe de fonctionnement du permiabilimètre de Blaine	82
Fig. II.2. Principe de préparation de la pate	83
Fig. II.3. Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance	84
Fig. II.4. Description du granulométrie.	87
Fig. II.5: Colonne de tamis	89
Fig. II.6: Méthode de l'éprouvette	91
Fig. II.7: Définition de l'équivalent de sable	92

INDEXE

Fig. II.8: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	96
Fig. II.9: Dispositif de rupture en compression	97
Fig. II.10 Appareillage pour la mesure du retrait	99
CHAPITRE.III. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	
Fig.III. 1. Courbe granulométrique du sable testé	105
CHAPITRE.IV. RESULTATS ET INTERPRETATION	
Figure. IV.1. Variation de la masse volumique absolue des ciments	109
Figure. IV.2. Variation de la consistance normale des ciments	110
Figure. IV.3. Evolution du début de prise des ciments étudiés	111
Figure. IV.4. Evolution de fin de prise des ciments étudiés	112
Figure. IV.5. Variation de la surface spécifique Blaine des ciments	113
Figure. IV.6. Distribution granulométrique (Addition) des ciments	115
Figure. IV.7. Distribution granulométrique (substitution)des ciments	115
Figure. IV.8. Evolution de la Resistance a la compression ciments	116
Figure. IV.9. Evolution de la Resistance a la flexion des ciments	117
Figure. IV.10. Evolution du retrait pour les ciments étudiés	118
Figure. IV.11. Evolution du gonflement pour les ciments étudiés	119

III.INDEXE DES PHOTOS

INTITULEE	PAGE
CHAPITRE.I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
Photo. I.1. Calcaire	59
Photo. I.2. Chaux Vive	59
Photo. I.3. Réaction en cours	59
Photo. I.4. Chaux éteinte	59
CHAPITRE.II. METHODES D'ESSAIS	
Photo. II.1. Densimètre	78
Photo. II.2. Perméabilimètre de Blaine	80
Photo. II.3. Appareil de VICAT	85
Photo. II.4. Tamiseuse électrique	88
Photo. II.5. Armoire humide	93
Photo. II.6. Malaxeur normalisé pour pâte et mortier	94

INDEXE

Photo. II.7. Moules pour éprouvettes de mortier	94
Photo. II.8. Appareil à chocs	94
Photo. II.9. Machine d'essais de résistance à la flexion	95
Photo. II.10. Machine d'essais à la compression	95
Photo. II.11. Déformètre	98