REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'**E**nseignement **S**upérieur et de la **R**echerche **S**cientifique

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA
Faculté des **S**ciences et de la **T**echnologie

MEMOIRE
Présenté pour l'obtention du diplôme de
MAGISTER

Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux et structures

THEME

CARACTERISATION DES CIMENTS ALGERIENS ET LEURS EFFETS SUR LES PERFORMANCES DU BETON

Par
M^{r} AZIZI Noureddine

Devant le jury composé de :

Dr. O. BOUKENDAKDJI	**MCA**	**Univ. de Médéa**	**Président**
Dr. F. DEBIEB	**MCA**	**Univ. de Médéa**	**Examinateur**
Dr. A. BOUIKNI	**MCA**	**Univ. de Blida**	**Examinateur**
Pr. S. KENAI	**PR**	**Univ. de Blida**	**Rapporteur**
Dr. B. MENNADI	**MCA**	**Univ. de Blida**	**Co-rapporteur**

Décembre 2011

Remerciements

Mes sincères remerciements vont à Pr Saïd KENAÏ et Dr Menadi BELKACEM qui ont bien voulu diriger ce modeste travail et pour leurs aides et leurs conseils très précieux, qui m'ont été très bénéfiques.

Mes remerciements vont à Dr O. BOUKENDAKDJI et Dr F. DEBIEB maîtres de conférences à l'Université Yahia FERÈS et Dr A. BOUIKNI maître de conférence à l'université Saad DAHLED de Blida ; qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Je tiens à remercier les responsables de laboratoire :

- A l'université de Médéa pour la mise en disposition les moyens des essais de la caractérisation du ciment, du sable et du gravier.
- À l'université de Blida pour la mise à la disposition les moyens des essais de la durabilité (Na_2SO_4 et $MgSO_4$), de la finesse et de la stabilité à chaux du ciment;
- À l'université de LAGHOUAT pour la mise à la disposition des moyens pour l'essai DRX en particulier Mlle S. Benarrache;
- Au CETIM (Boumerdès), en particulier Mr TOUFAHI et DAOUDI, pour l'accueil et l'analyse chimique et minéralogique du ciment ;

Je tiens à remercier aussi les responsables du laboratoire SETAM (Médéa), en particulier Mr DOUIFI, pour l'accueil et pour la mise à la disposition les moyens pour l'essai de caractérisation du sable et graviers et le gérant de la SARL AHLEM pour la mise en disposition des moules pour Béton ; mon cousin Azizi El Hadi, mes collègues Sakhri, Mesrati, Benouered, Bouchou, Mazari, Laidani, Gouacem, Ibrir, Zaoui, Bouderbala, Zekoumi et Safiddine.

Ma gratitude va à tous mes enseignants à l'université Yahia FERÈS de Médéa.

Enfin, je remercie tout particulièrement ma mère, ma femme, mes filles Insaf, Ichrak et Nourellah, mes Frères, mes sœurs, et mes amis. C'est grâce à leur soutien et leur courage que j'en suis là aujourd'hui. Je leur dédie ce manuscrit en gage de ma reconnaissance.

ملخص

توجد في الجزائر أكثر من ثلاثة عشرة مصنعا للإسمنت لإنتاج مختلف أنواع الإسمنت، التغير في منبع التموين بالإسمنت متكرر. معرفة خصائص الإسمنت المستعمل و أثره على خصائص الخرسانة ضرورية لتجنب أراء شخصية حول نوعية الإسمنت.

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو تحديد خصائص الإسمنت المتوفر في السوق الجزائرية ووضع في متناول المهندسين مرجع لاختيار نوع الاسمنت في حالة الضرورة. في هذه الدراسة، تم تحديد الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية لاسمنت 13 مصنعا جزائريا و مصنعان أجنبيان (تركيا و تونسيا)، خصائصهم إزاء التآكل وسط كبريتات الصوديوم و المغنزيوم أيضا تمت دراستها، بالإضافة إلى تجارب مقاومة الضغط و الانعطاف و امتصاص الخرسانة للماء المصنوعة من هذه الأنواع من الاسمنت تم انجازها.

الدراسة بينت وجود تغير هام في الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية وخاصة سلوكه إزاء الوسط الكبريتي. الخرسانة المصنوعة من طرف هذا الاسمنت بينت أيضا تغير مرتفعا في خصائصه.

الكلمات المفتاحية : الإسمنت، المونة، الخرسانة، الإضافة، النعومة، زمن التماسك، الإنكماش، مقاومة الإنضغاط، الإمتصاص، مقاومة الكبريتات .

RESUME

En Algérie, il existe plus de 13 cimenteries produisant différents types et classes de ciment. Le changement de la source d'approvisionnement du ciment est fréquent. La connaissance des caractéristiques du ciment utilisé et son effet sur la performance du béton est indispensable pour éviter les avis subjectifs sur la qualité du ciment. L'objectif principal de ce projet est la caractérisation des ciments disponibles sur le marché algérien et la mise à disposition des ingénieurs d'un document de référence pour le choix de type de ciment si nécessaire. Dans cette étude, on a déterminé les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des ciments des 13 cimenteries algériennes et 02 étrangères, il s'agit celle de la Turque et la Tunisie. Leurs performances vis-à-vis de l'attaque des sulfates de sodium et de magnésium ont aussi été étudiées. En plus des essais de résistance à la compression, à la flexion et à l'absorption capillaire du béton à base de ces ciments ont été réalisé. L'étude a montré l'existence d'une variation importante dans les caractéristiques physiques et mécaniques et en particulier leur comportement vis-à-vis des milieux sulfateuses. Les bétons fabriqués à partir de ces ciments ont aussi montré une variation élevée des leurs performances.

Mots clés : Ciment, Mortier, Béton, Ajout, Finesse, Temps de prise, Retrait, Résistance à la compression, Absorption capillaire, Résistance aux sulfates.

ABSTRACT

In Algeria, there are 14 cement factories producing different types and classes of cement. The change of the source of cement used on site is frequent. The knowledge of the properties of the cement used and its effect on the performance of concrete is necessary to avoid subjective opinions on the quality of cement. The main objective of this study is to characterize the cements available in the Algerian Market and to make available a reference document for site engineers for the choice of cement source when necessary. In this study, 13 cements from Algerian factories and two foreign cements (from turkey and Tunisia) were analyzed. The physical and mechanical properties were measured and compared. Their performance under sulfate (sodium and magnesium) attack was evaluated. The performance of concrete made with these cements through compressive and flexional strength and water absorption tests was also evaluated. The experimental results have shown an important variation of the cements properties and in particular their performance under sulfate attack. The properties of concrete made with these cements also showed a high variation.

Key words : Cement, Mortar, Concrete, Addition, Fineness, Setting time, Shrinkage, Compressive strength, Capillary absorption, Sulfate resistance.

TABLE DES MATIERES

REMERCIMENTS

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTES DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA PRODUCTION DU CIMENT ET SES CARACTERISTIQUES

I.1 Généralité 3

I.2 Fabrication du ciment 3

I.3 Type de ciment 7
I.3.1 Ciment portland artificiel 7
I.3.2 Ciment aux ajouts 10
a) Fumée de silice 12
b) Cendres volantes 13
c) laitier granulé de haut fourneau 16
d) Schistes calcinées 17
e) Pouzzolanes naturelles 18
f) Calcaires 19
g) Autres ajouts 21
I.4.3 Différents types de ciments courants normalisés 24

I.5 Industrie de ciment en Algérie 29

I.6 Hydratation de ciment 31

I.7 Hydratation des ciments pouzzolaniques et au laitier 37

I.8 Durabilité du béton 40
I.8.1 Perméabilité 40
I.8.2 Porosité 40
I.8.3 Absorption d'eau dans le béton 42
I.8.5 Attaque par les sulfates 44

I.9 Conclusion 48

CHAPITRE II: MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS REALISES

II.1 Introduction 49

II.2 Matériaux utilisés 49
II.2.1 Ciments 49
II.2.2 Sable 50

II.2.3 Gravier 51
II.2.4 Eau 52

II.3 Caractéristiques physiques 52
II.3.1 Essai sur le ciment anhydre 52
II.3.1.1 Mesure de la Finesse 52
II.3.1.2 Masses volumiques 53
II.3.2 Essai sur la pâte de ciment durcissant 54
II.3.2.1 Consistance normale 54
II.3.2.2 Temps de prise 55
II.3.2.3 Expansion (stabilité) 55

II.4.Essais mécaniques 56
II.4.1.Préparation du mortier 56
II.4.2 Essai de consistance sur mortier par maniabilimètre 57
II.4.3 Préparation des éprouvettes 58
II.4.4 Essai de résistance à la traction par flexion 58
II.4.5 Essai de résistance à la compression 58
II.4.6 Mesure du retrait 59

II.5 Essai de porosité par immersion totale 60

II.6 Résistances aux sulfates 61
II.6.1 Expansion 61
II.6.2 Perte en masse 62

II.7. Caractéristiques chimiques et minéralogiques 62

II.7.1 Caractéristiques chimiques 62
II.7.2. Caractéristiques minéralogiques 65

II.8 Composition et confection des éprouvettes 68

II.9 Essais sur béton 71
II.9.1 Ouvrabilité 71
II.9.1 Résistance à la compression 71
II.9.1 Résistance à la flexion 72
II.9.1 Essai d'absorption d'eau par capillarité 73

II.10 Variable étudiées 74

CHAPITRE III : ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.1 Introduction 76

III.2 Essais chimiques et minéralogiques 76
III.2.1 Essais chimiques 76
III.2.2 Essais minéralogiques (analyse microscopique) 77
III.2.3 Essais minéralogiques (DRX) 77

III.3. Caractéristiques physiques 85
III.3.1 Finesse 85
III.3.2 Masses volumiques 86
III.3.3 Consistance sur la pate de ciment composé utilisé 88
III.3.4 Temps de début et fin de prise des ciments composés utilisés 89

III.3.5 Expansion à chaux (stabilité) 91
III.4 Consistance des mortiers par le maniabilimètre 92
III.5 Evolution de la résistance à la compression du mortier..... 93
III.6 Evolution de la résistance à la flexion du mortier..... 97
III.7 Masse volumique du mortier..... 100
III.8 Evolution du retrait des différents ciments utilisés 106
III.9 Influence du ciment sur l'absorption capillaire..... 108
III.10 Influence du ciment sur l'ouvrabilité du béton 110
III.11 Résistance à la compression du béton..... 111
III.12 Résistance à la flexion du béton..... 111
III.13 Masse volumique et porosité du béton..... 114
III.14 Influence du type de ciment sur l'absorption capillaire du béton..... 115
III.12. Résistance des mortiers normalisés aux sulfates..... 116
III.12.1.Perte en masse 116
III.12.2.Expansion 119
III.12.3 Aspect visuel 119

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 122

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Evolution approximative de la résistance du CEMI	9
Figure I.2	Production de ciment dans le monde de 1950 à 2006	10
Figure I.3	Dépenses énergétique pour la production de différents types de ciment	11
Figure I.4	Emissions de CO2 lors de la production de différents types de ciment	11
Figure I.5	Effet de l'ajout de fumée de silice sur la compacité d'un mélange liant-granulat	13
Figure I.6	Chaleurs d'hydratation comparées d'un C.P.A. avec 20% et 40% de cendres (béton dosé à 350kg/m^3)	15
Figure I.7	Effet pouzzolanique des cendres volantes	15
Figure I.8	Influence des cendres volantes sur l'évolution de la structure poreuse des pates de ciment au cours du temps	16
Figure I.9	Résistance à la compression des ciments avec ajout de laitier	17
Figure I.10	Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage de la pouzzolane naturelle de surface spécifique de 4000 cm^2/g	18
Figure I.11	Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de la pouzzolane naturelle de surface spécifique de 4000 cm^2/g	19
Figure I.12	Evolution de l'expansion à chaux en fonction du pourcentage de la pouzzolane naturelle de surface spécifique de 4000 cm^2/g	19
Figure I.13	Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage de l'ajout calcaire de surface spécifique de 4050 à 4100 cm^2/g	20
Figure I.14	Résistance à la compression des deux bétons faits avec 100% de ciment et 10% de métakaolin	23
Figure I.15	Evolution du temps de début et fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture (CEMII/A :SOUR EL GHOZLANE ,AIN EL KEBIRA ,CEMII/B H. ESSAOUD)	28
Figure I.16	Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture (CEMII/A :SOUR EL GHOZLANE ,AIN EL KEBIRA ,CEMII/BHADJAR ESSAOUD)	29

Figure I.17	Evolution du retrait et gonflement des ciments en fonction de la finesse de mouture finesse de mouture (CEMII/A :SOUR EL GHOZLANE ,AIN EL KEBIRA ,CEMII/BHADJAR ESSAOUD)	29
Figure I.18	Développement de la résistance des constituants purs de ciment.	34
Figure I.19	Représentation schématique de la formation des phases d'hydrate et le développement de structure pendant l'hydratation du ciment	35
Figure I.20	Evolution du taux d'hydratation en fonction du temps	36
Figure I.21	Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté	38
Figure I.22	Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton	41
Figure I.23	Coefficient de sorptivité en fonction de la résistance à la compression (béton série A)	43
Figure I.24	Coefficient de sorptivité en fonction de la résistance à la compression (béton série B)	43
Figure I.25	Changement de masse des spécimens immergés dans les solutions de sulfates	47
Figure I.26	Résultats des essais ASTM C1012 sur mortier	48
Figure II.1	Sable de Baghlia	50
Figure II.2	Courbe granulométrique du sable de Baghlia	51
Figure II.3	Gravier de Kaf El Assel (3/8)	51
Figure II.4	Gravier de Kaf El Assel (8/15)	51
Figure II.5	Courbes granulométriques des deux classes du gravier (3/8 et 8/15) utilisées	52
Figure II.6	Perméabilimètre de Blaine	53
Figure II.7	Dispositif de mesure de la masse volumique apparente	54
Figure II.8	Appareil de Vicat	55
Figure II.9	Appareil de mesure de stabilité du ciment (Chatelier)	56
Figure II.10	Malaxeur à axe vertical du mortier	57
Figure II.11	Maniabilimètre à mortier	57

Figure II.12	Principe de fonctionnement du maniabilimètre	58
Figure II.13	Dispositif de l'essai de flexion trois points	59
Figure II.14	Dispositif de l'essai de compression	59
Figure II.15	Appareillage pour la mesure du retrait	60
Figure II.16	Mise en solution des éprouvettes dans les solutions Na_2SO_4 et $MgSO_4$	61
Figure II.17	Extensomètre	62
Figure II.18	Schéma d'un diffractomètre à compteur	66
Figure II.19	Vue d'ensemble du diffractomètre à rayons X	68
Figure II.20	Proportions des granulats utilisés	69
Figure II.21	Malaxage du béton	70
Figure II.22	Moules utilisés	70
Figure II.23	Cône d'Abrams	71
Figure II.24	Dispositif de l'appareil de compression	72
Figure II.25	Dispositif de l'appareil de flexion	72
Figure II.26	Schéma de l'essai d'absorption d'eau	73
Figure II.27	Détermination de la sorptivité	74
Figure II.28	Variable étudiées pour les essais réalisés dans l'étude expérimentale	75
Figure III.1.a	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Meftah	80
Figure III.1.b	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 32.5 Rais Hamidou	80
Figure III.1.c	Diagramme de DRX appliqué le CEM II/A 42.5 Sour El Ghozlane	80
Figure III.1.d	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Béni Saf	81
Figure III.1.e	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Saida	81
Figure III.1.f	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Chlef	81

Figure III.1.g	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Ain El Touta	82
Figure III.1.h	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Ain El Kebira	82
Figure III.1.i	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Hama Bouziane	82
Figure III.1.j	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Hadjar El Soud	83
Figure III.1.k	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Tebessa	83
Figure III.1.l	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 M'sila	83
Figure III.1.m	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 Maascar	84
Figure III.1.n	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Turquie	84
Figure III.1.o	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Tunisie	84
Figure III.1.p	Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Chlef et le CEM II/A 42.5 Saida (diagrammes superposés).	85
Figure III.2	Finesse des ciments utilisés	85
Figure III.3	Masse volumique absolue des différents ciments utilisés	86
Figure III.4	Masse volumique apparente des différents ciments utilisés	88
Figure III.5	Consistance normale des différents ciments utilisés	89
Figure III.6.a	Temps de début de prise des différents ciments utilisés	90
Figure III.6.b	Temps de fin de prise des différents ciments utilisés	90
Figure III.7	Expansion à chaux (stabilité) des différents ciments utilisés	91
Figure III.8	Temps de maniabilité des différents ciments utilisés	92
Figure III.9	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des différents ciments utilisés	95
Figure III.10.a	Résistance à la compression à jeune âge (court terme) des différents ciments utilisés (2 et 7 jours)	96
Figure III.10.b	Résistance à la compression à long terme (28, 90 et 180 jours) des différents ciments utilisés	96

Figure III.11	Evolution de la résistance à la à la flexion en fonction de l'âge des différents ciments utilisés	97
Figure III.12.a	Résistance la flexion à jeune âge (court terme) des différents ciments utilisés (2 et 7 jours)	99
Figure III.12.b	Résistance la flexion à long terme (28, 90 et 180 jours) des différents ciments utilisés	99
Figure III.13	Corrélation entre la masse volumique et la résistance à la compression des différents ciments utilisés	105
Figure III.14.a	Evolution du retrait des différents ciments utilisés jusqu'à 28 jours	106
Figure III.14.b	Evolution du retrait à court et à long terme en fonction de l'âge des différents ciments utilisés	107
Figure III.15.a	Absorption capillaire du mortier des différents ciments jusqu'à 2 heures	109
Figure III.15.b	Absorption capillaire du mortier des différents ciments jusqu'à 24 heures	109
Figure III.16	Absorption capillaire des éprouvettes des différents ciments utilisés	110
Figure III.17	Ouvrabilité des bétons des différents ciments utilisés	110
Figure III.18	Résistance à la compression du béton à 28 jours des différents types ciments utilisés	111
Figure III.19	Résistance à la flexion en fonction des différents ciments utilisés	113
Figure III.20	Densités du béton des différents ciments	114
Figure III.21	Porosités du béton en fonction des différents ciments	114
Figure III.22.a	Evolution de l'absorptivité du Béton en fonction du temps jusqu'à 2 heures	115
Figure III.22.b	Evolution de l'absorptivité du Béton en fonction du temps jusqu'à 24 heures	115
Figure III.23	Evolution de la masse des mortiers en fonction de la période d'émersion en Na_2SO_4	118
Figure III.24	Evolution de la masse des mortiers en fonction de la période d'émersion en $MgSO_4$	118

Figure III.25	Evolution de l'expansion des éprouvettes en mortier en fonction de la période d'immersion en 5%Na_2SO_4	120
Figure III.26	Evolution de l'expansion des éprouvettes en mortier en fonction de la période d'immersion en 5%$MgSO_4$	120
Figure III.27	Eprouvettes en mortier des ciment utilisés après l'immersion dans une solution de 5% Na_2SO_4	121
Figure III.28	Eprouvettes en mortier de ciment de Hama Bouziane et Chlef immergées en dans une solution de 5%Na_2SO_4	121
Figure III.29	Eprouvettes en mortier normalisé émergées en $MgSO_4$	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Teneur moyenne des oxydes constitutifs du clinker	4
Tableau I.2	Tableau synoptique de la fabrication du ciment.	5
Tableau I.3	Composition minéralogique du clinker	8
Tableau I.4	Exigences chimiques pour la fumée de silice	13
Tableau I.5	Composition chimique de l'ajout tuf utilisé dans la cimenterie de Sour El Ghozlane	21
Tableau I.6	Déférents types de ciment courants selon EN 197-1	25
Tableau I.7	Valeurs maximales pour la composition chimique selon EN 197-1	26
Tableau I.8	Valeurs de la résistance à la compression des classes de ciments selon EN 197-1	27
Tableau I.9	Valeurs garanties de résistances selon EN 197-1	27
Tableau I.10	Spécifications physiques selon EN 197-1	28
Tableau I.11	Capacités installées de la production annuelle du ciment du groupe ERC	30
Tableau I.12	Utilisations des ajouts dans les cimenteries algériennes	31
Tableau I.13	Relation entre le rapport E/C et le temps de segmentation du réseau capillaire des pâtes de ciment portland	41
Tableau II.1	Ciments portland composés utilisés	49
Tableau II.2	Masses volumiques, équivalent de sable et module de finesse du sable de Baghlia utilisé	50
Tableau II.3	Masses volumiques des deux classes des graviers utilisés	52
Tableau III.1	Composition chimiques des ciments utilisés	78
Tableau III.2	Composition minéralogique des ciments utilisés	79
Tableau III.3	Masse volumique absolue, finesse, teneur et nature de l'ajout minéral et la teneur du gypse des différents types de ciments utilisés	87
Tableau III.4	Résistance à la compression à différents âges des ciments utilisés	94

Tableau III.5	Résistance à la flexion des à différents âges des ciments utilisés	98
Tableau III.6	Masses volumiques des mortiers testés	100
Tableau III.7	Résistance à la compression du béton 15*15*15 des ciments utilisés	112
Tableau III.8	Résistance à la Flexion du béton	113
Tableau III.9	Coefficient d'absorption du béton	116

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Aft	Trisulfoaluminate hydraté
Al_2O_3	Oxyde d'Aluminium
C	Dosage en ciment
C_2S	Silicate bicalcique (belite)
C_3A	Aluminate tricalcique
C_3S	Silicate tricalcique (alite)
C_4AF	Aluminate-ferrite tétracalcique
$CaCO_3$	Carbonate de calcium
CaO	Oxyde de calcium
$CaSO_4$	Gypse anhydre
CO_2	Oxyde de carbone
CPA	Ciment portland artificiel
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
DRX	Diffractomètre au rayon X
E	Dosage en eau
E/C	Rapport eau/ciment
ES	Equivalent de sable
Fe_2O_3	Oxyde de fer
FeSi	Ferrosilicium
I	Indice d'hydraulicité
K_2O	Oxyde de potassium
Max	Maximum
Min	Minimum
MF	Module de finesse
MgO	Oxyde de magnésium

$MgSO_4$	Sulfate de magnésium
MK	Métakaolin
Mvmoy	Masse volumique moyenne
Na_2SO_4	Sulfate de sodium
R	Rapide
R^2	Coefficient de corrélation
R_2j	Résistance à 2 jours
R_7j	Résistance à 7 jours
$R_{28}j$	Résistance à 28 jours
$R_{90}j$	Résistance à 90 jours
$R_{180}j$	Résistance à 180 jours
Rcmoy	Résistance à la compression moyenne
Rfmoy	Résistance à la flexion moyenne
SiO_2	Oxyde de silicium
SO_3	Sulfate
SSB	Surface spécifique de Blaine
TOC	Teneur en matière organique
t	Temps
σ	Ecart type

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde. Le constituant principal donnant au béton sa résistance mécanique et sa performance à long terme est le ciment. La connaissance des propriétés physiques et mécaniques du ciment est indispensable.

En Algérie, les pouvoirs publics ont lancé un programme très ambitieux dans le domaine de la construction (plus de un millions de logement accompagnés des équipements publics par quinquennal). Pour la concrétisation de ce programme, le pays sera appelé à consommer plus de 18 millions de tonnes de ciment par année.

Le ciment est produit à travers 13 usines d'une capacité théorique de 18 millions de tonnes. Par conséquent, en moyenne deux millions de tonnes de ciment sont importées annuellement. Le changement de la source d'approvisionnement en ciment sur site est fréquent. Afin d'éviter les avis subjectifs sur le choix de ciment, la connaissance de ces propriétés est nécessaires.

L'appréciation de la qualité d'un ciment doit être basée sur des essais d'identification et de performance à court et à long terme. La variabilité de certaines propriétés et caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, mécaniques des ciments, mortiers et béton ainsi que la durabilité de ce dernier dépend des matières extraites des carrières, la fabrication du clinker, le broyage, le type et le pourcentage de l'ajout utilisé.

Sur site et en l'absence de document de référence comparatif de la performance des différents ciments disponible sur le marché, des avis subjectifs basés sur la couleur ou la source sont courants.

L'objectif principal de ce travail est de caractériser les différents ciments disponibles sur le marché algérien. Quatorze (14) ciments fabriqués en Algérie et deux (02) ciments importés ont été analysé. Les essais réalisés sont : la mesure de la finesse, la masse volumique absolue et apparente du ciment anhydre, la consistance normale, le temps de prise sur la pâte du ciment, l'expansion (stabilité), la maniabilité du mortier normalisé, la résistance à la flexion et à la compression, la mesure du retrait, la porosité par immersion totale, l'absorption capillaire des éprouvettes en mortier normalisé, les caractéristiques chimiques et minéralogiques (essais avancés DRX et MEB), l'ouvrabilité du béton, sa résistance à la

flexion, à la compression du béton et l'essai de l'absorption d'eau par capillarité du béton. La performance de ces ciments sous l'effet de l'attaque sulfatique a aussi été étudiée.

Pour cela nous avant réparti notre travail comme suit :

Après une introduction générale, une revue bibliographique sur la production du ciment et ses caractéristiques est présentée dans le premier chapitre.

Dans le chapitre 2, nous étalons notre programme expérimental, les différents matériaux utilisés ainsi que les différentes techniques utilisées.

Le chapitre 3 présente les résultats de la caractérisation physique et mécaniques des différents types de ciments, ainsi que les indicateurs de la durabilité (porosité, absorption et résistance en milieux sulfateuses).

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale, qui rappelle les principaux résultats obtenus et propose des recommandations pour d'éventuels futurs travaux.

Chapitre I

Revue bibliographique sur la production du ciment et ses caractéristiques

I.1 Généralités

Dans ce chapitre, on présente une revue bibliographique sur la production du ciment et ses caractéristiques. Dans un premiers temps, on présente la fabrication du ciment et son hydratation avec l'exposition des différents ajouts utilisés dans l'industrie cimentière ainsi que la durabilité des bétons ou mortier dans les milieux sulfatiques.

I.2 Fabrication du ciment

Le **ciment** est un liant hydraulique c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps [1]. Il est composé d'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 [2]. Ces derniers se trouvent dans la nature sous forme de minéraux constitués principalement de calcaire et d'argile. Les matières premières contiennent aussi d'autres éléments tels que la magnésie MgO, les sulfates, les sulfures, les alcalins K_2O et Na_2O avec des taux très limités [1]. L'oxyde de magnésie, ou périclase, MgO : Tant que la teneur en MgO reste inferieure à 2% du mélange cru, son effet est bénéfique et réside dans une accélération de la combinaison de la chaux dans le four. Au-delà de 3%, MgO constitue un élément nocif car, exprimé sous forme de périclase, il peut être l'objet d'une expansion lente au sein du ciment hydraté durci. Sa teneur doit être limité à moins de 5% afin d'éviter la présence de MgO à l'état libre [3].

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est le composé constitué par les nouvelles espèces formées au cours des réactions chimiques qui se produisent lors de la cuisson d'un mélange de matières premières qui sont le calcaire et l'argile, dans des proportions moyennes respectivement 80 % et 20 % dans un four à haute température. La **fabrication** de ciment comporte :

a) L'extraction

L'extraction consiste généralement pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières dans la plus part des cas à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite pour alimenter les concasseurs. En ce qui concerne les argiles qui sont beaucoup plus meubles, l'excavateur ou de roues-pelles constituent les moyens les plus utilisés. Les matériaux extraits présentant des granulométries allant jusqu'au $1m^3$ [1].

b) Concassage

Le concassage effectué le plus souvent sur les lieux même de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100 mm au maximum [1].

c) Préparation du cru

Au cours de la préparation du cru, on réalise un mélange homogène d'argile et de calcaire. Selon leurs compositions chimiques, les proportions sont déterminées et sont toujours proche du rapport de 80 % de calcaire pour 20 % de l'argile. Le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker, dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est représentée dans le tableau I.1. Il est très généralement nécessaire d'affiner cette composition par l'ajout d'autres produits de carrière ou sous-produit industriels. Les principaux ajouts correctifs sont :

- Les cendres volantes, résidu de la combustion du charbon.
- Les cendres de pyrite, résidu de grillage de ce minéral constituent une des sources de complément en fer.
- La bauxite, minerai naturel de l'aluminium.
- Le sable, silice à peu prés pure.
- les laitiers de haut fourneau, sous-produits de la fabrication de la fonte.
- Les schistes, issus du métamorphisme des argiles.

Tableau I.1 : Teneur moyenne des oxydes constitutifs du clinker [1, 3].

Oxydes constitutifs	Teneur limites (%)	Valeur moyenne (%)
CaO	60 à 69	65
SiO_2	18 à 24	21
Al_2O_3	4 à 8	6
Fe_2O_3	1 à 8	3
MgO	0 à 5 max	2
Alcalis	0 à 2 max	1
SO_3	0 à 3 max	1

La préparation du cru peut être réalisée suivant quatre procédés différents (voir tableau I.2) selon l'état des matériaux et certaines considérations économiques:

Tableau I.2 : Tableau synoptique de la fabrication du ciment [4, 5].

Tronc commun	Extraction en carrière (ciel ouvert) (Calcaire, argile, marne) Concassage Transport	
4	<u>Voie humide</u> Délayage (+broyage) Dosage Stockage Four	<u>Voie sèche</u> Concassage Pré homogénéisation Broyage – séchage Homogénéisation (fluidisation) Four
	<u>Voie semi – humide</u> Filtration Boudinage Four	<u>Voie semi – sèche</u> Granulation Four
	CLINKER	
Tronc commun	Broyage Gypse + constituants secondaires éventuellement (laitier, cendre, pouzzolane,..) Stockage Expédition (sac, vrac)	

La fabrication par voie sèche est la plus utilisé pour réduire la consommation d'énergie. Elle comporte les phases suivantes :

1) **Préhomogénéisation**

Elle a pour but de réaliser un mélange préliminaire, c'est la phase qui consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de Préhomogénéisation » [1].

2) **Broyage-séchage**

Ce mélange est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grains de granulométrie inférieure à 160 µm.

3) **Séparation**

Les particules insuffisamment broyées sont renvoyées au broyeur et les fines continuent dans les gaz sont récupérées.

4) **Homogénéisation**

Un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux est exécuté pour obtenir un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniforme, apte à être cuit.

d) Cuisson

Réalisé dans des fours rotatifs à une température comprise entre 1400 et 1500 °C, elle permet la transformation du cru en clinker, le cycle de traitement comportant les phases suivantes :

- Le préchauffage
- La décomposition des argiles (au dessus de 500 °C).
- La décarbonatation des calcaires (à 950 °C).
- La clinkérisation (à 1450 °C).

e) Refroidissement

Cette opération à pour but d'abaisser la température qui est de l'ordre de 1200 à 1450°C à la sortie du four à environ 50/250 °C suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C_3S en C_2S qui entraine une baisse des résistances [1]. Un refroidissement lent permet la cristallisation des composants du clinker, et assure une meilleur broyabilité et une haute résistance à long terme [6]. Un refroidissement rapide permet de maintenir le C_3S dans un état métastable, et rend le clinker difficile à broyer, le ciment obtenu développe une haute résistance précoce mais peut se détériorer avec le temps [6]

f) Broyage

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre et d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (pour réguler le phénomène de prise), ainsi que d'autre constituants (cendre volante, calcaire, laitier,…), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments [1].

g) Stockage, ensachage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac.

I.3 Types de ciment

I. 3.1 Ciment portland artificiel

Le ciment portland artificiel contient au moins 95 % de clinker [1]. Il est obtenu par broyage du seul clinker additionné de 3 à 5 % de sulfate de calcium, sous forme de gypse ou d'anhydrite. La densité apparente du ciment portland est de l'ordre de 0.95 à 1.2 g/cm^3. Sa masse spécifique est de 3.05 à 3.5 g/cm^3. Le clinker pur très fin est caractérisé par de courts délais de prise de 3 à 5 minutes ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est dû surtout à l'hydratation du C_3A qui s'hydrate rapidement. On introduit le gypse qui réagit avec le C_3A pour retarder et régulariser la prise. Le clinker qu'est obtenu à la sortie des fours se présentant sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines comme l'illustre le tableau I.3.

Le calcul de la composition potentielle du ciment portland est fondé principalement sur le travail de Bogue [7] :

- Pour $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

  $C_3S = 4{,}07(CaO) - 7{,}60(SiO_2) - 6{,}72(Al_2O_3) - 1{,}43(Fe_2O_3) - 2{,}85(SO_3)$,

  $C_2S = 2{,}87(SiO_2) - 0{,}75(3CaOSiO_2)$,

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

  $C_4AF = 3{,}04(Fe_2O_3)$

- Pour $Al_2O_3/Fe_2O_3 < 0.64$

  $C_3S = 4{,}07(CaO) - 7{,}60(SiO_2) - 4{,}48(Al_2O_3) - 2{,}86(Fe_2O_3) - 2{,}85(SO_3)$,

  $C_2S = 2{,}87(SiO_2) - 0{,}75(3CaOSiO_2)$,

  $C_3A = 0$,

  $C_4AF = 2{,}10(Al_2O_3) + 1{,}70(Fe_2O_3)$

Tableau I.3 : Composition minéralogique du clinker [1].

Composée	Proportions moyennes (%)	Propriétés des ciments
C_3S	50 à 70	Libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par C_2S. résistance rapide et élevée aux premiers âges. Il influe sur la prise finale.
C_2S	5 à 25	Résistance élevée à moyen et long terme. Chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.
C_3A	2 à 12	Resistance initiale élevée. La réaction d'hydratation est la plus exothermique. Elle contribue essentiellement à la prise de la pate de ciment. Elle contribue assez peu à la résistance finale. Facilement attaquée par les sulfates.
C_4AF	0 à 15	Rôle mineur dans les réactions du durcissement du ciment (pas d'effet sur la résistance du ciment).
Chaux libre	Ne doit pas excéder 2%	Pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau.

Pour les clinkers (et par conséquent pour les matières premières entrant dans leur composition), une série de ratio ou « modules » caractéristiques ont été définis concernant leur composition chimique [8, 9]:

- Module hydraulique = $\frac{CaO}{SiO2+Al2O3+Fe2O3}$ = 1,7 à 2,2,
- Module silicique = $\frac{SiO2}{Al2O3+Fe2O3}$ = 2,4 à 2,7,
- Module alumino-ferrique = $\frac{Al2O3}{Fe2O3}$ = 1,5 à 2,5
- Degré de saturation en chaux = $\frac{CaO}{2,8\ SiO2+1,1\ Al2O3+0,7\ Fe2O3}$ = 0,85 à 0,98

Un facteur de saturation en chaux trop faible rend plus difficile le chauffage du four et la proportion de C_3S dans le clinker sera trop faible pour développer la résistance initiale [10].

On définit aussi l'indice d'hydraulicité comme suit [1, 4, 11] :

- Indice d'hydraulicité $I = \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} = \frac{SiO2+Al2O3}{CaO+MgO}$
  - Lorsque $I \leq 0.5$ le ciment est dit basique (portland).
  - Lorsque $I > 0.5$ le ciment est dit neutre (riche en laitier).
  - Lorsque $I = 1$ le ciment est dite acide.

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice d'hydraulicité est plus élevé. On préconise généralement les règles suivantes [1, 4, 11]:

$$1.40 < \frac{CaO}{SiO2} < 1.45$$

$$0.45 < \frac{Al2O3}{SiO2} < 0.50$$

Les ciments portlands artificiels de teneur en silicate tricalcique élevée présentent l'inconvénient de conduire à des bétons ayant un fort retrait [11]. La résistance d'un ciment portland croit irrégulièrement : au troisième jour elle atteint à peu prés 40 à 50 % de celle de sa classe et au septième jour 60 à 70 %. A 28 jours elle atteint sa classe de résistance nominale. On estime grossièrement que l'accroissement de résistance des ciments portlands artificiels suit une loi logarithmique (Fig I.1) :

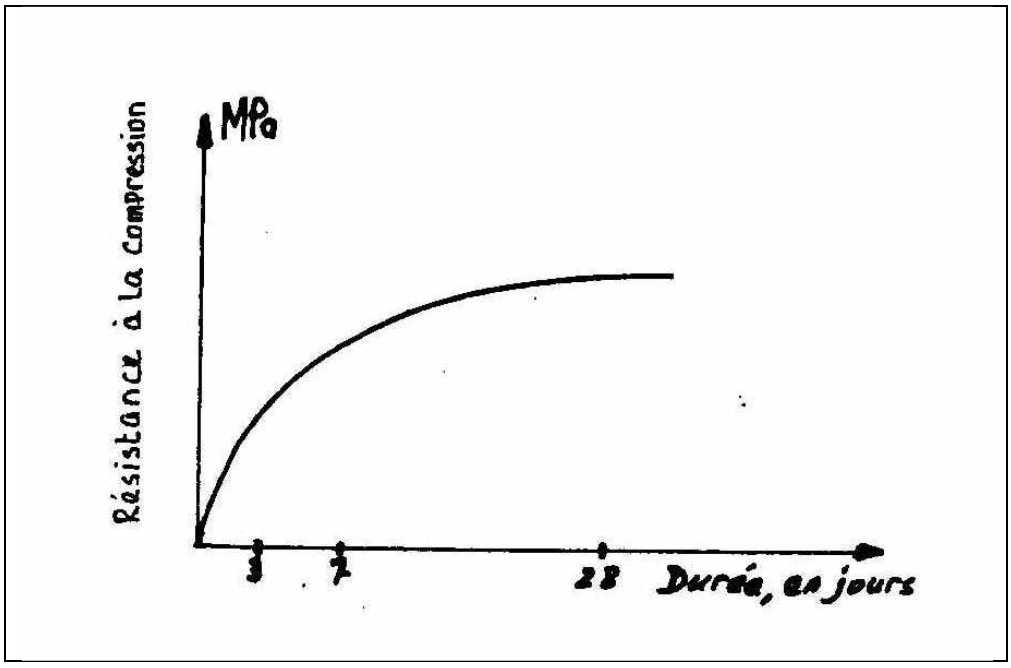


Fig I.1 : Evolution approximative de la résistance du CEMI [11, 12].

I.3.2 Ciment aux ajouts

La production mondiale de ciment progresse régulièrement depuis 1950 (Fig. I.2). Elle ne cesse d'augmenter dans les pays en voie de développement. L'industrie du ciment est une industrie à forte consommation d'énergie, son coût représente généralement 40 % des coûts de production. L'addition d'ajouts lors du broyage du clinker réduit le dégagement en CO_2 lors de la cuisson et réduit la consommation d'énergie.

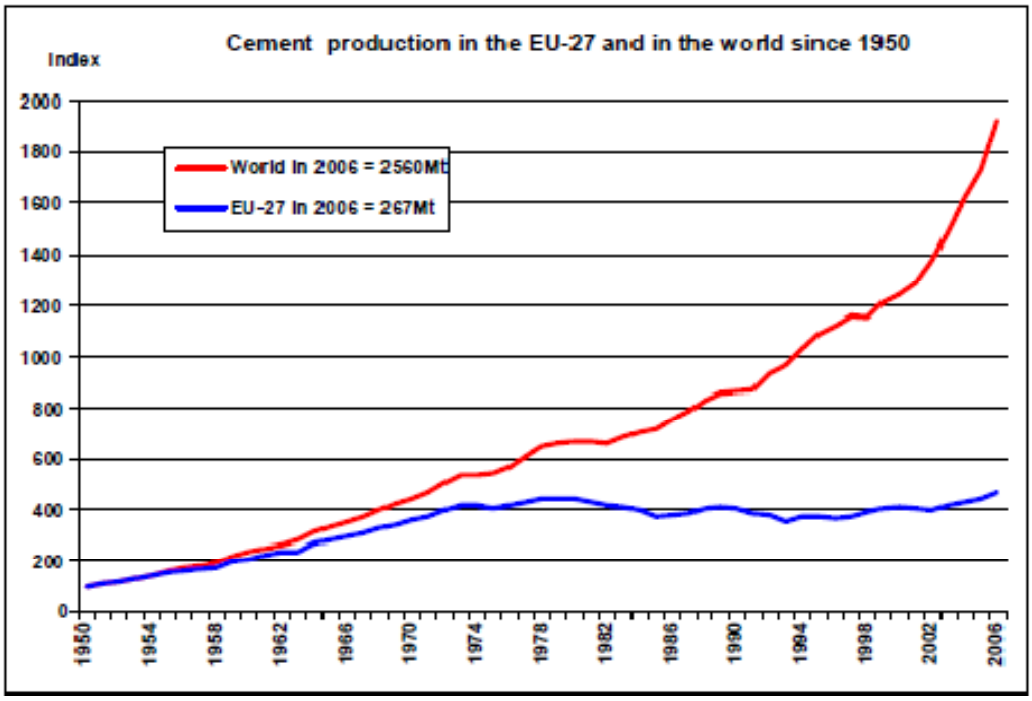


Fig I.2 : Production de ciment dans le monde de 1950 à 2006 [13]

La figure I.3 ci-après montre que le contenu énergétique du ciment varie selon le type de ciment et sa classe de résistance. En comparant le ciment de haut-fourneau CEM III/A avec le ciment portland CEM I, on remarque que l'énergie nécessaire à la combustion et l'énergie électrique diminuent d'environ 40%. L'influence de l'utilisation de ciments composés sur les émissions de CO_2 pendant le processus de production de ciment peut être déduit auprès de la figure I.4 [14].

Indépendamment de ces avantages écologiques et économiques, des ajouts appropriés influent positivement sur certains des propriétés du béton, à l'état frais, mais surtout à l'état durci. De plus, sans ajout, certains bétons avec propriétés particulières (béton à faible chaleur d'hydratation, bétons teintés, béton à retrait compensé, etc.) ne pourraient pas être fabriqués.

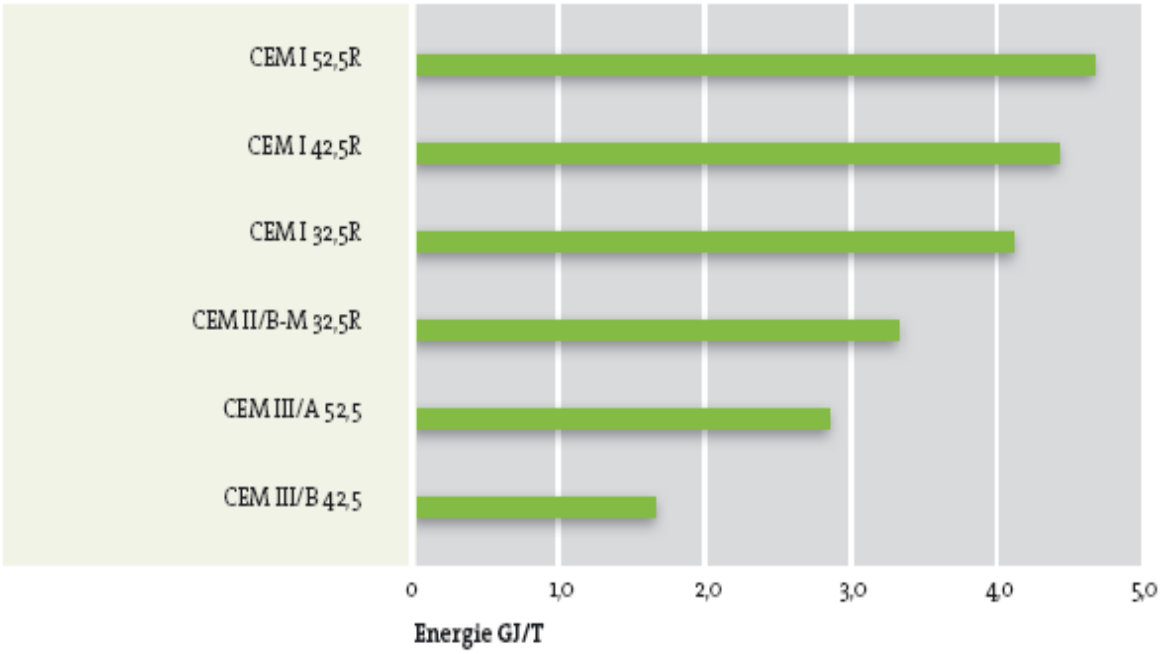


Fig I.3: Dépenses énergétique pour la production de différents types de ciment [14]

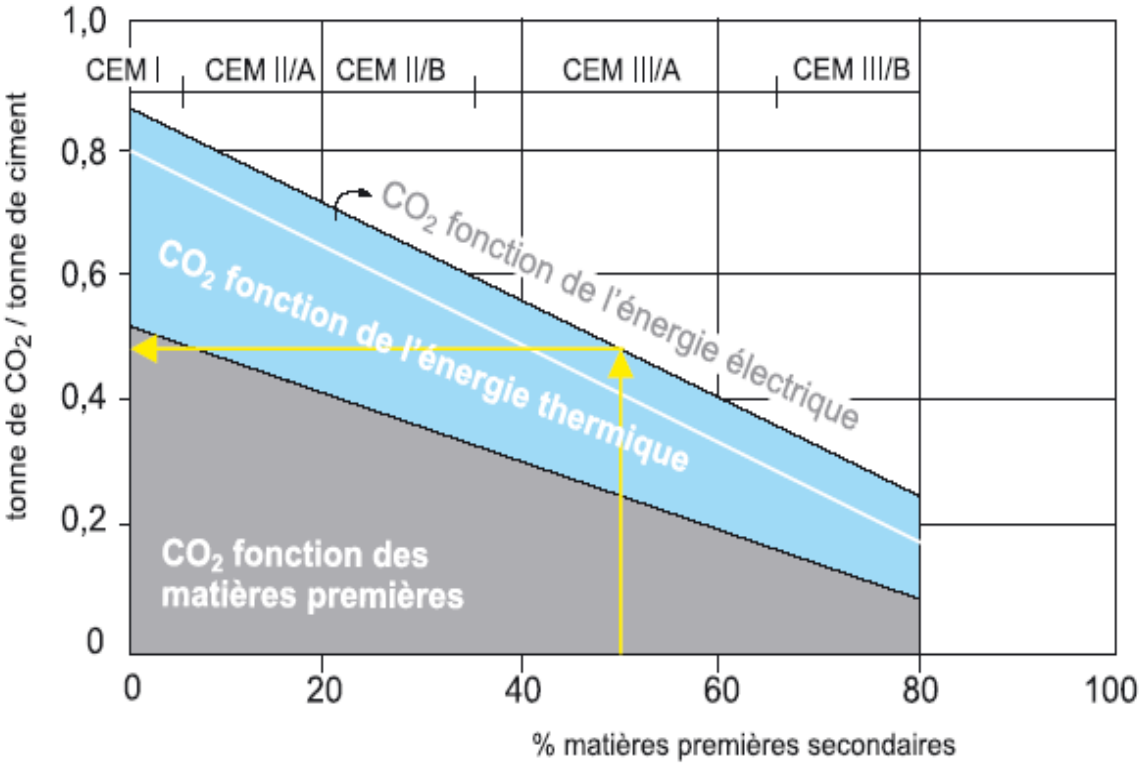


Fig I.4: Emissions de CO2 lors de la production de différents types de ciment [14]

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelquefois également au béton.

Selon la norme ENV 206 [15], il existe deux types d'additions :

- **Les additions de type I :** Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnées qui par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau…). Parmi ces additifs, on distingue le calcaire et la poussière.
- **Les additions de type II:** Matériaux finement divisés à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés.

Les principaux ajouts utilisés sont :

a) Fumée de silice (D):

La fumée de silice est un sous produit des usines de fabrication d'alliage de silicium et de ferrosilicium obtenu dans un four à arc électrique à partir de quartz de grande pureté et de charbon [10]. La fumée de silice est constituée de particules très fines, environ 100 fois plus petites que les grains de ciment (SSB = 20000 m^2/kg) [1]. La plupart ayant un diamètre compris entre 0.03 et 0.3 µm, le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1 µm [10]. La fumée de silice présente des propriétés pouzzolaniques en raison de sa forte teneur en silice amorphe (vitreuse) et en raison de sa finesse, qui complète la granulométrie des ciments. Ces deux effets entrainent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice. Elle permet de créer des points de nucléation pour augmenter la vitesse d'hydratation. Ainsi après 7 jours on observe une augmentation plus rapide de la résistance. A 28 jours prés des trois quarts de la fumée de silice réagissent et on obtient une résistance plus importante [10]. Lorsqu'elle est ajoutée lors du broyage du ciment, la proportion est de l'ordre de 6 à 8%.

Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice, par la forme sphérique de ses grains, permettre de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux faible porosité. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant [16].

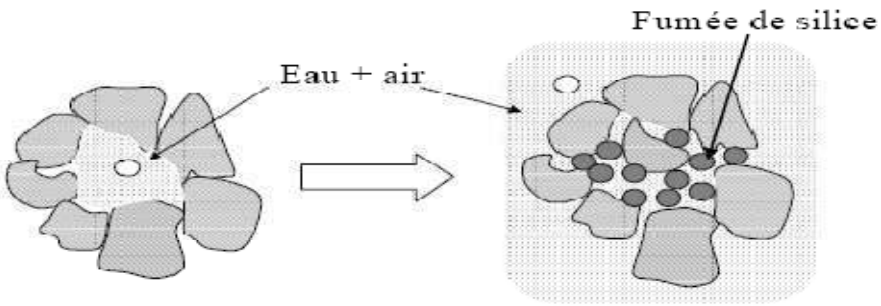


Fig I.5: Effet de l'ajout de fumée de silice sur la compacité d'un mélange liant-granulat [16]

Le tableau I.4 montre les exigences chimiques de la norme ASTM 1240-00 pour la fumée de silice.

Tableau I.4 : Exigences chimiques pour la fumée de silice [17].

Matériau :	
SiO_2, Min	85%
Teneur en humidité, Max	3%
Perte au feu, Max	6%
Propriétés :	
Indice d'activité pouzzolanique, Min	85% à 7 jours de cure accélérée (E/C variable)
Retenu sur la passoire de 45 microns, Max	10%
Surface spécifique (m2/g), Min	15

En plus de la réduction de la porosité, la diminution de la perméabilité (augmentation de la durabilité) et l'augmentation de la résistance, La fumée de silice présente d'autres avantages tels que la réduction du ressuage, de la ségrégation et l'amélioration de la liaison entre la pâte et le granulat. Mais pour avoir une bonne ouvrabilité, il faut utiliser les superplastifiants, bien malaxé pour casser les agglomérâtes. L'augmentation du retrait est possible [18]. Le ciment aux fumées de silice est principalement utilisé dans les bétons dits à hautes performances (B.H.P).

b) Les cendres volantes

Les cendres volantes sont appelées cendres pulvérisées de combustible. Elles sont recueillies à partir des installations de dépoussiérage électrostatique ou mécanique des fumées de centrale thermique de charbon. Les particules de cendres volantes sont

sphérique et par conséquent avantageuses du point de vue de la demande en eau. Elles se présentent sous forme de poudre grise–noirâtre [4], La densité est en général de 2.35 [10]. Elles ont une finesse très élevée avec un diamètre compris entre (1 et 100 µm). Leurs surfaces spécifiques de Blaine sont généralement comprises entre 250 et 600 m^2/kg. La grande surface spécifique signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium. Elles sont composées essentiellement de SiO_2 et Al_2O_3 [10]. Les principales exigences de la norme ASTM C 618 [19] concernent une teneur minimale de 70 % de silice, d'alumine, et d'oxyde de fer pris tous trois dans leurs ensemble (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3). Le mélange avec le ciment donne un véritable liant car le $Ca(OH)_2$ se combine avec le SiO_2 et Al_2O_3 des cendres. Les cendres volantes peuvent être siliceuses ou calciques.

La présence des cendres volantes dans le béton réduit la quantité d'eau ce qui induit une amélioration de l'ouvrabilité. Cette dernière est habituellement attribuée à la forme sphérique des cendres volantes [10]. Le temps de prise est augmenté, la résistance à la compression diminue au jeune âge [20]. Le retrait après prise n'est jamais augmenté par l'addition des cendres même lorsque celles-ci sont très fines. L'absorption d'eau par capillarité est augmentée par l'addition de ces cendres au ciment et la chaleur d'hydratation initiale diminue, l'utilisation de 20% de cendres améliore la résistance aux eaux agressives [5]. Les chaleurs d'hydratation dégagées lors de la prise du ciment aux cendres volantes diminuent régulièrement avec l'augmentation du pourcentage de cendre ajoutée comme le montre la figure I.6. L'effet notable des cendres volantes est d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolanique (Fig. I.7). La cinétique de la réaction pouzzolanique des cendres volantes est très lente et dépend de nombreux facteurs (surface spécifique, composition, inclusions de phases cristallines dans la phase vitreuse, teneurs en alcalin et en sulfate du ciment,…). Les réactions pouzzolaniques des cendres volantes dans la matrice cimentaire se déroulent longtemps après le coulage, ce qui tend à améliorer la structure du matériau en resserrant la porosité comme le montre la figure I.8. Elle permet aussi de réduire le risque alkali silicate et réduire le risque de fissuration thermique dans les grandes masses. Une cure importante est nécessaire.

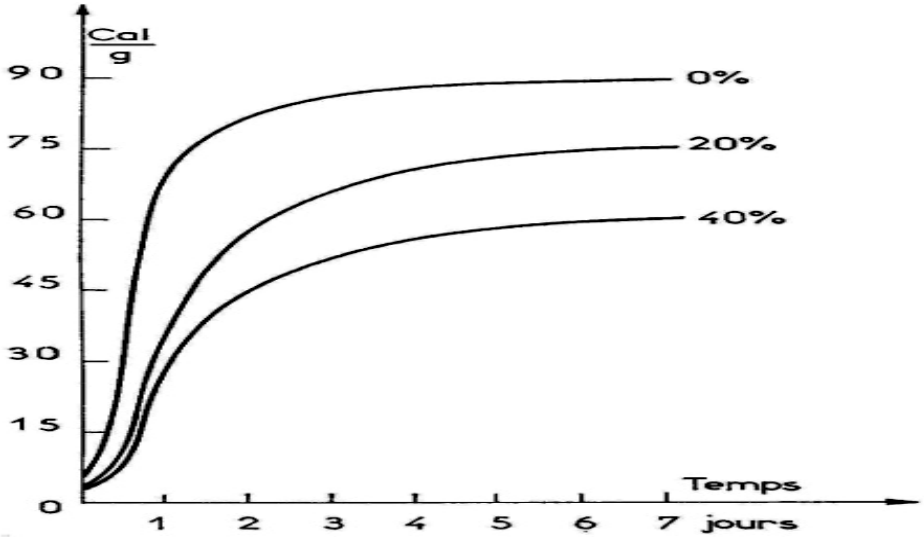


Fig I.6: Chaleurs d'hydratation comparées d'un C.P.A. avec 20% et 40% de cendres (béton dosé à 350kg/m^3) [5].

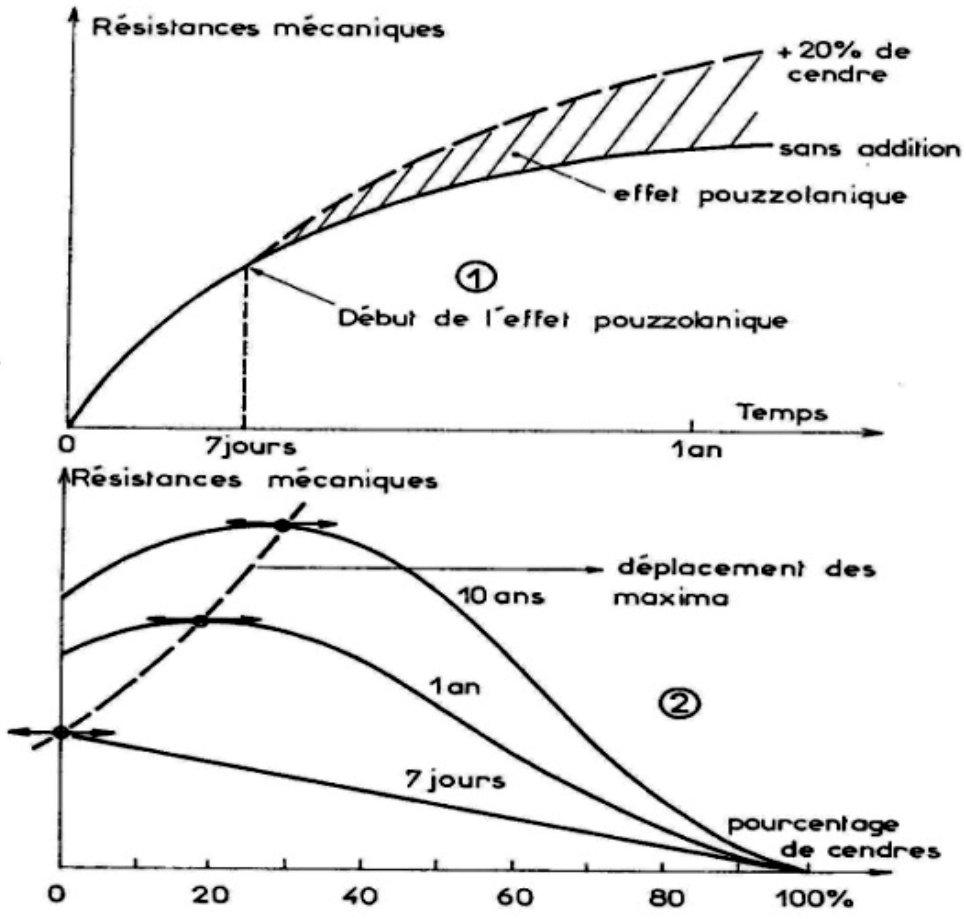


Fig. I.7: l'effet pouzzolanique des cendres volantes

(1) en fonction du temps et (2) en fonction du pourcentage des cendres [5].

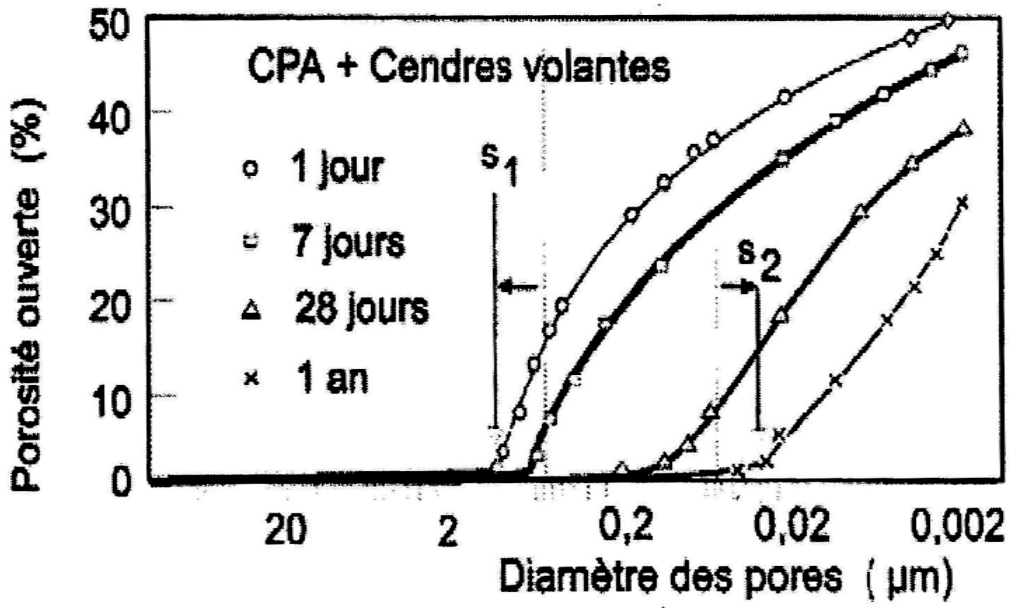


Fig. I.8: Influence des cendres volantes sur l'évolution de la structure poreuse des pates de ciment au cours du temps [16].

c) Le laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier granulé de haut fourneau est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidie par aspersion d'eau. C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. Tous ces éléments sont pratiquement les mêmes que ceux du clinker [1]. Selon la norme NF EN 197 – 1 [21], Le laitier granulé de haut fourneau doit contenir au moins deux tiers, en masse de laitier vitreux. Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d´au moins deux tiers, en masse de la somme CaO, MgO et SiO_2. Le restant contient Al_2O_3 avec, en outre, de faibles quantités d´autres oxydes. Le rapport en masse (CaO + MgO)/(SiO_2) doit dépasser 1.0 [21]. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre, il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates. Les ciments contenant 40% où plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates et en particulier si la teneur en C_3A est faible [22]. La densité du laitier granulé broyé de haut fourneau est d'environ 2.9, elle est inferieure à la densité du ciment portland ordinaire (3.1) [10].

La présence du laitier dans le mélange de mortier de ciment ou béton permet d'avoir :

- ❖ Un temps de prise plus long.

- ❖ Une faible chaleur d'hydratation ce qui réduit le risque de fissuration thermique dans les grandes masses.
- ❖ Une meilleure ouvrabilité.
- ❖ Une faible résistance à jeunes âge et une bonne résistance à long terme (Fig. I.9).
- ❖ Une réduction de la porosité et une diminution de la perméabilité
- ❖ L'augmentation de retrait est possible.

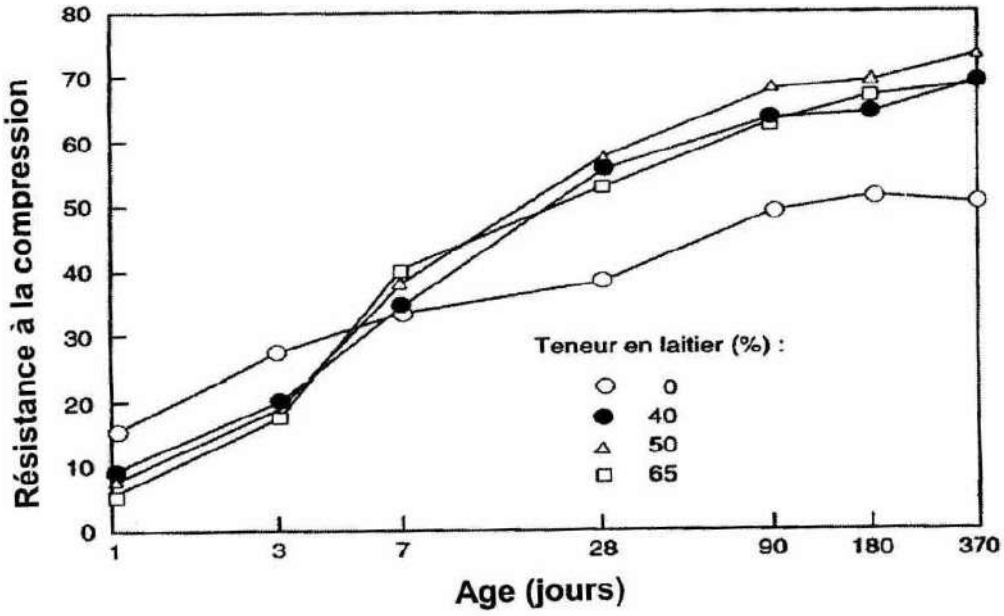


Fig. I.9 : Résistance à la compression des ciments avec ajout de laitier [23].

d) Schistes calcinées (T)

Les schistes calcinés sont issus de roches sédimentaires ou métamorphiques obtenus à des températures de l'ordre de 800°C. En outre leurs propriétés pouzzolaniques présentent des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés [1]. Ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libres (CaO) et des sulfates de calcium, ainsi que des oxydes en quantités plus importantes. Si la proportion de schistes calcinés dans le ciment excède (% en masse (constituant principal) seuls les schistes calcinés satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisés. Les schistes calcinés, finement broyés, doivent avoir une résistance à la compression d'au moins 25 MPa à 28 jours. Leur expansion doit être inférieure à 10 mm en utilisant un mélange de 30 % en masse de schistes calcinés broyés et de 70 % en masse de ciment de référence [4, 24].

e) Pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits naturels issus des roches volcaniques ou des roches sédimentaires, composés essentiellement de silice $SiO_2 \geq 25$ %, alumine Al_2O_3 et oxyde ferrique Fe_2O_3, la somme des trois oxydes (SiO_3+Al_2O_3+Fe_2O_3) doit être supérieure à 70 % selon la norme ASTM C 618 [19]. Elles sont employées en cimenterie pour leurs propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire l'aptitude à fixer la chaux à la température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques pouvant faire prise et durcir par hydratation [10]. Son ajout dans le clinker avec le gypse produit des réactions chimiques qui commencent dés l'addition de l'eau, les premiers produits qui se forment sont l'ettringite et la portlandite. Un ciment pouzzolanique est un ciment à faible chaleur d'hydratation. L'addition de 10% à 40% de pouzzolane naturelle augmente la quantité d'eau nécessaire à l'obtention de la consistance normale (Fig. 1.10). Pour la pouzzolane naturelle de Beni saf (Algérie) de surface spécifique de Blaine de poudre de 3560 cm^2/g, la masse volumique absolue est de 2.75 g/cm^3 et apparente de 1.02 g/cm^3 [25]. Le temps de prise diminue avec l'augmentation de pourcentage de pouzzolane (Fig. 1.11). L'expansion à chaux augmente avec le pourcentage de la pouzzolane (Fig. I.12). La pouzzolane permet d'améliorer l'imperméabilité des bétons aux ions chlores et une amélioration de la résistance aux acides et aux sulfates [26]. La réaction pouzzolanique conduit à une réduction de la chaux libre dans la pate de ciment et donc réduire le risque d'attaque des sulfates [26].

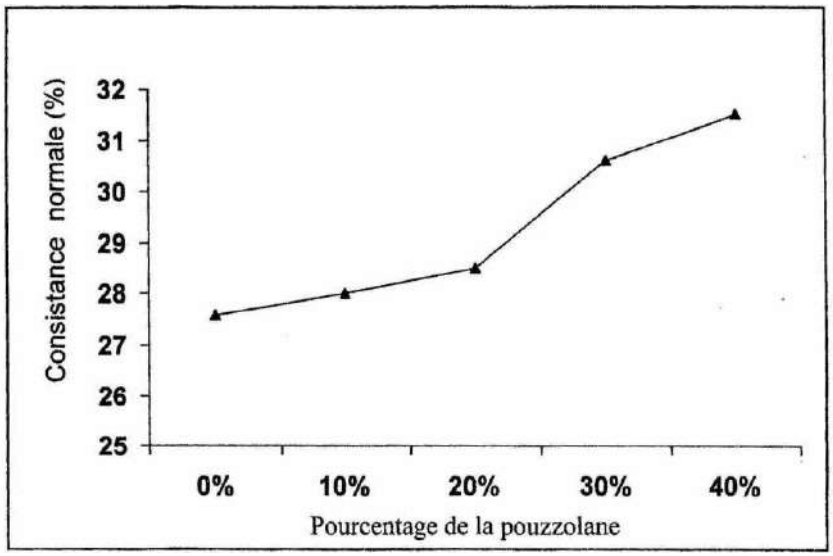


Fig. I.10: Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage de la pouzzolane naturelle de surface spécifique de 4000 cm^2/g [26].

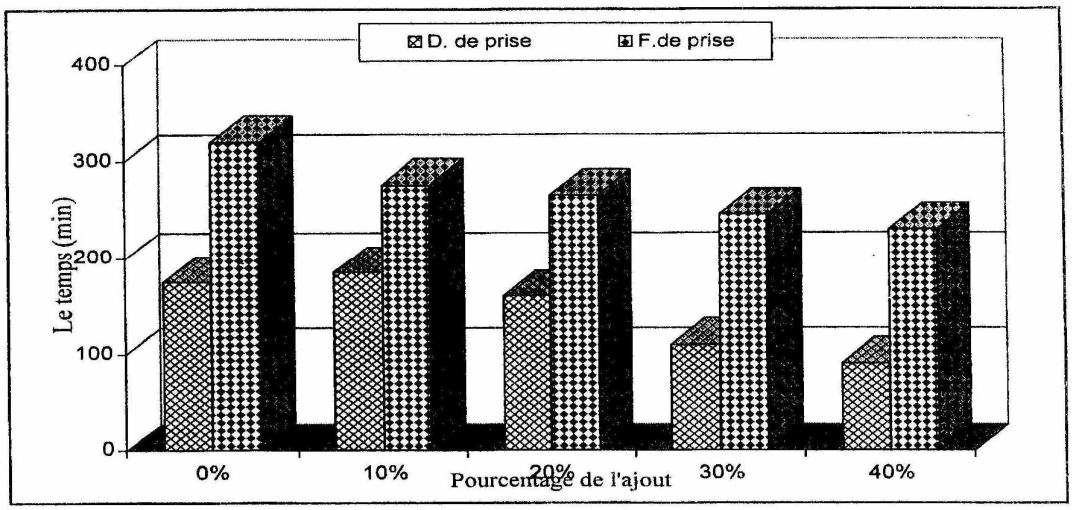


Fig. I.11 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage de la pouzzolane naturelle de surface spécifique de 4000 cm^2/g [26].

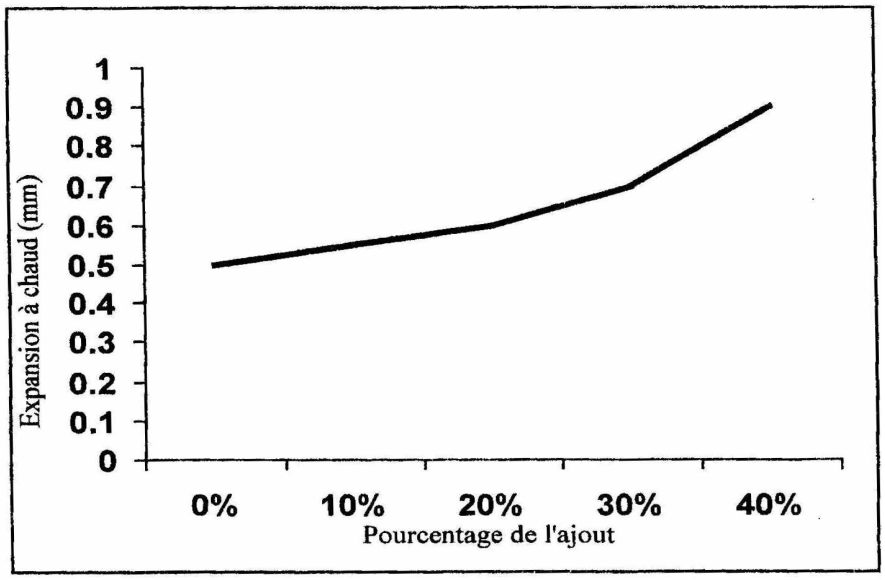


Fig. I.12 : Evolution de l'expansion à chaux en fonction du pourcentage de la pouzzolane naturelle de surface spécifique de 4000 cm^2/g [26].

f) Calcaires (L)

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaire pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. Les fillers calcaires ajoutés au ciment doivent présenter une proportion de carbonate de calcium $CaCO_3$ supérieur à 75% en masse, une teneur en argile telle que l'absorption de bleu méthylène soit au plus de 1.2 g pour 100 g et une teneur en

matière organique (T.O.C) au plus égale à 0.5 % [1, 27]. Cependant, les calcaires contenants de la dolomite sont instables et peut entrainer l'autodestruction du béton. Les particules du calcaire comble les vide entre les particules de clinker ce qui conduit à une réduction de la demande en eau, et ainsi à une densification de la structure de la pate durcie de ciment. Les fines calcaires contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons en augmentant la cohésion et en s'opposant à la ségrégation [28]. Le calcaire avec un pourcentage élevé en $CaCO_3$ donne une meilleure ouvrabilité du béton que celui qui contient un faible taux de $CaCO_3$ [29]. L'effet du ressuage est globalement négatif, ce qui conduit à un effet bénéfique d'une incorporation d'addition calcaire [30]. L'incorporation de d'ajout calcaire tend à diminuer la demande en eau des ciments avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout calcaire comme le montre la figure I.13.

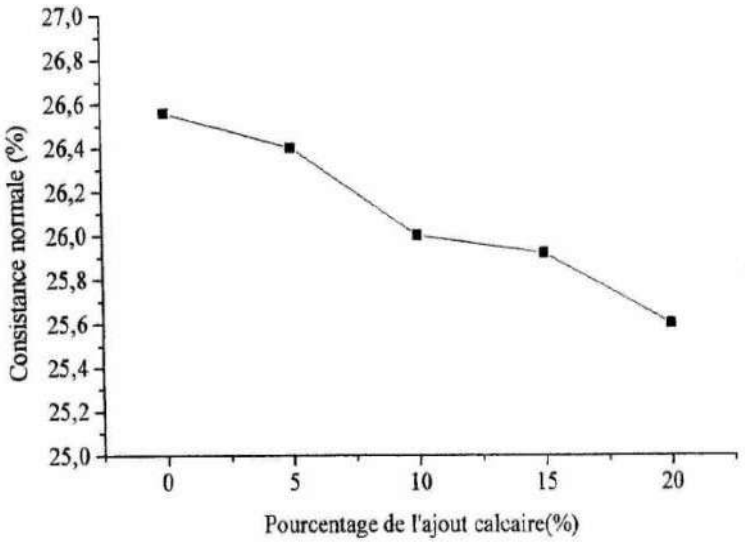


Fig. I.13 : Evolution de la consistance normale en fonction du pourcentage de l'ajout calcaire de surface spécifique de 4050 à 4100 cm^2/g [31].

Le temps de prise pour les ciments avec 10, 15 et 20% d'ajout calcaire est diminué par rapport au ciment sans ajout [31].

La porosité augmente avec le pourcentage d'ajout à 28 et 90 jours, mais reste négligeable à jeune âge. La résistance aux sulfates des ciments avec ajout calcaires est améliorée. L'incorporation de 10 à 15% d'ajout, conduit à une diminution de l'expansion et un maintien de résistance à la compression des éprouvettes. L'addition de 2% à 5% de calcaire au ciment type II peut d'une manière signifiante augmenter le retrait de dessiccation à 4 jours [32].

g) Autres ajouts

i) Tufs :

C'est un matériau avec une granulométrie assez stables plus de 90% de particules sont inferieure à 10 mm, sa densité varie de 1.093 à 1.216 kg/l. Le tableau I.5 montre la composition chimique de l'addition minérale de l'ajout tuf utilisées dans la cimenterie de Sour El Ghozlane.

Tableau I.5: Composition chimique de l'ajout tuf utilisé dans la cimenterie de Sour El Ghozlane [33]

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P.F	Cl^-
Teneurs %	54.92	13.94	4.69	13.96	1.47	0.65	4.05	1.75	4.77	0.0033

L'étude qu'a été faite sur l'utilisation du tuf comme ajout par l'EREG à la cimenterie de Meftah [34] fait ressortir :

- l'augmentation de la quantité de tuf augmente la perte au feu de 1.97 % à 5.39 %.
- la teneur en chaux libre du ciment reste conforme à la norme (2.3 à 3.16 %).
- la densité du ciment diminue de 1.091 à 1.038 kg/l.
- les temps du début et de la fin de prise et entre ces deux augmentent avec l'augmentation de la quantité de tuf.
- la surface spécifique de Blaine (SSB) augmente avec l'augmentation de pourcentage d'ajout tuf.
- le pourcentage d'eau augmente avec le pourcentage d'ajout tuf pour avoir la consistance normalisée.
- la résistance mécanique à 2, 7 et 28 jours diminue avec l'augmentation de la quantité du tuf.
- la possibilité de produire un ciment portland avec ajout de la classe 42.5 avec 25 % d'ajout tuf.

ii) Poussière :

C'est une matière à particules fines, récupérées à la sortie du four lors de son passage avec la fumée. Sa surface spécifique de Blaine est de 7000 à 9000 cm^2/g. Son taux

d'humidité est de 0.73 %. L'utilisation de la poussière dans la fabrication du ciment à trois objectifs : l'économie de ciment, la diminution de la pollution de l'environnement et la résolution du problème de dépoussiérage nécessaire dans les cimenteries [35]. L'ajout poussière augmente le temps de prise pour 10% d'ajout et accélère celui-ci pour 15% et 20% [36]. Il augmente la quantité d'eau nécessaire pour avoir la consistance normale et augmente ainsi la résistance à la flexion et à la compression. Le ciment composé a donné une résistance au gel et dégel comparable à celle du ciment ordinaire [36]. Le retrait et le fluage sont élevés ce qui rend le problème délicat en fonction du pourcentage d'ajout [36].

iii)Métakaolin :

Le kaolin est une argile blanche, tendre, pure, de plasticité variable mais généralement faible, qui conserve sa couleur blanche à la cuisson. Son efficacité dans l'amélioration des propriétés du béton est prouvée par plusieurs études en laboratoire et par les résultats sur chantiers [37]. Le métakaolin, issu d'une activation thermique du kaolin, est une pouzzolane de synthèse utilisée comme addition minérale dans les bétons et les liants hydrauliques. Les bétons contenant du métakaolin présentent des comportements similaires à ceux contenant de la fumée de silice, c'est-à-dire une amélioration de la résistance mécanique et une réduction significative de la perméabilité. Cette addition entraîne aussi une réduction du retrait du béton. Certains auteurs ont constaté qu'une addition de l'ordre de l5% de métakaolin confère une capacité supérieure de résistance en milieux agressifs, tels ceux des eaux de mer et des solutions acides. Les différentes expériences montrent que le métakaolin ajouté au béton peut avoir plusieurs rôles :

- Accroissement des performances mécanique des bétons par l'effet pouzzolanique du métakaolin et l'effet filler associé à sa granulométrie fine, il en résulte une amélioration notable des propriétés mécaniques des bétons, déjà nettement observables avant 28 jours (Fig. I.14).

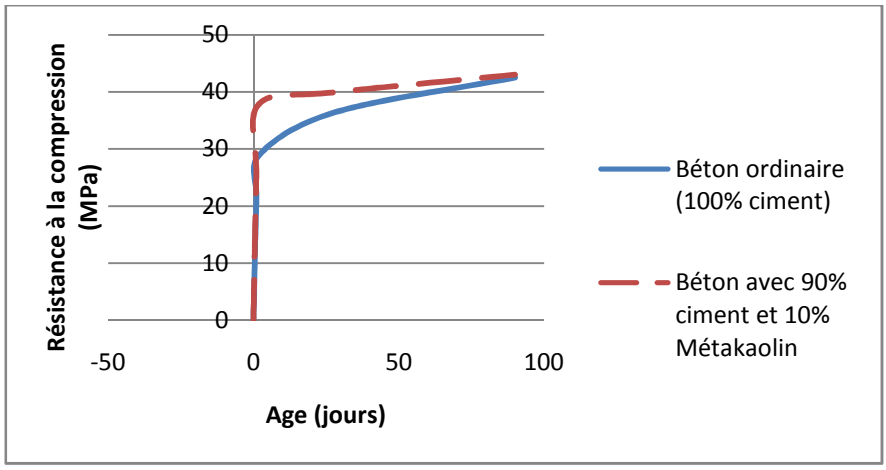


Fig. I.14 : Résistance à la compression des deux bétons faits avec 100% de ciment et 10% de métakaolin [37]

- Capter la chaux libérée lors de la réaction d'hydratation du ciment, augmenter la compacité du béton et diminuer la porosité du béton et augmenter la résistance chimique (chlorures, sels de déverglaçage, acides organiques etc. …)
- Homogénéisation de la teinte des bétons et des mortiers et limitation voire disparition des phénomènes d'efflorescences et de carbonatation.

iv) La vase calcinée

Les vases sont des sédiments complexes qui couvert une gamme étendue de particules inferieures à 40 microns mais peuvent contenir une quantité notable d'éléments sableux. L'addition de la vase calcinée au ciment donne les résultats suivants [38]:

- Le pourcentage de l'eau augmente en fonction du pourcentage d'ajout vase calcinée pour avoir la consistance normalisé, par contre le temps de prise diminue en fonction du pourcentage d'ajout vase calciné.
- La stabilité des ciments composés à base de la vase calcinée reste dans la norme.
- La résistance à la compression et à la traction avec le pourcentage d'ajout de vase calcinée de 5% reste comparable à celle sans ajout à 28 jours.
- Les ciments aux ajouts de la vase calcinée ont des bonnes propriétés mécaniques dans tous les milieux agressifs à long terme. Ils peuvent être utilisés comme un ciment composé destinée aux ouvrages de Béton Armé. La vase récupérée du barrage peut être classées dans la catégorie des minéraux actifs.

I.4 Les différents types de ciments courants normalisés

L'industrie cimentaires commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages, qu'il s'agisse de résister à une certaine attaque physique ou chimique, de présenter des caractéristiques mécaniques compatibles avec les contraintes appliquées ou encore pour tenir compte d'une mise en œuvre particulière. Selon que des constituants, autre que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments. Le tableau I.6 présente les différents types de ciments courants normalisés avec leurs compositions. Les ciments sont répartis en trois classes de résistances : 32.5, 42.5 et 52.5, définis par leurs valeurs minimales de la résistance normale du ciment à 28 jours.

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau I.7, quant à leur composition chimique.

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression à 28 jours, la norme spécifiant une limite inferieure et une limite supérieure dont les valeurs dont les valeurs sont situées dans le tableau I.8. Les valeurs garanties des résistances à 2, 7 et 28 jours sont indiquées dans le tableau I.9.

En plus, la norme EN 197-1 [21] propose des limites sur le temps de prise de ciment, le retrait à 28 jours et la stabilité (Tableau I.10).

Pour tous les types de ciments courants, la valeur de l'expansion mesurée à chaud et à froid sur éprouvette de pâte pure doit être inferieure à 10 millimètre [1].

Les ciments portland CEM I et les ciments portland composées CEM II des classes 32.5 et 42.5 doivent avoir à 28 jours, un inferieur à 800 ou 1000 micromètres par mètre selon le type et classe de ciment [1].

Tableau I.6 : Déférents types de ciment courants selon EN 197-1 [21]

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

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

Tableau I.7 : Valeurs maximales pour la composition chimique selon EN 197-1 [21]

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CHK-CEM III	Toutes classes	≤ 5 %
Oxyde de magnesium MgO	CPA-CEM I	Toutes classes	≤ 5 %
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CHK-CEM III	Toutes classes	≤ 5 %
Sulfates SO_3 limite supérieure	CPA-CEM I et CPJ-CEM II (*)	32.5 32.5 R 42.5	≤ 3.5 %
	CPZ-CEM IV et CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5 R Toutes classes	≤ 4 % ≤ 4 %
Chlorures	Tous types de ciment (**)	52.5 R Toutes les autres classes	≤ 0.05 % ≤ 0.05 %

(*) Valable pour les CPJ-CEMII/A et B à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituant, autre que le clinker, pour lesquels la limite est de 4.5 % pour toutes les classes de résistance.

(**) Les CHF-CEM III/A et B et les CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0.10 % de chlorures mais dans ce cas la teneur réelle doit être déclarée.

Tableau I.8: Valeurs de la résistance à la compression des classes de ciments selon EN 197-1 [21]

Classe	Résistance à la compression (N/mm^2) ou (MPa)			
	Résistance au jeune âge		Résistance normale	
	2 jours	7 jours	28 jours	
	Li	Li	Li (1)	Ls (2)
32.5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R (*)	≥ 13.5	-		
42.5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R (*)	≥ 20	-		
52.5	≥ 20	-	≥ 52.5	-
52.5 R (*)	≥ 30	-		

(*) La lettre R indique que le ciment a une résistance élevée au jeune âge.

(1) Li : limite inférieure nominale pour une spécification donnée, respecté avec probabilité de 95 % pour les résistances et de 90 % pour les autres propriétés.

(2) Ls : limite supérieure nominale pour une spécification donnée, respecté avec probabilité de 90 %.

Tableau I.9: Valeurs garanties de résistances selon EN 197-1 [21]

Classe des ciments	Résistances garanties à 2 jours (MPa)	Résistances garanties à 7 jours (MPa)	Résistances garanties à 28 jours (MPa)
32.5		17.5	30
32.5 R	12		30
42.5	10		40
42.5 R	18		40
52.5	18		50
52.5 R	28		50

Tableau I.10: Spécifications physiques selon EN 197-1 [21]

Classe	32.5	32.5 R	42.5	42.5 R	52.5	52.5 R
Temps de début de prise en minutes	≥ 90		≥ 60			
Retrait des CEMI et CEM II (µm/m)	≤800	≤1000			-	
Stabilité (mm)	10					

La norme EN 197-1 [21] ne donne aucune limite sur la finesse des ciments. La finesse est généralement caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et la prise est accélérée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes. Par contre, plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important [39]. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée [39].

Les figures I.15 à I.17 montrent l'effet de la finesse sur le temps de prise, la résistance à la compression et le retrait de trois ciments algériens.

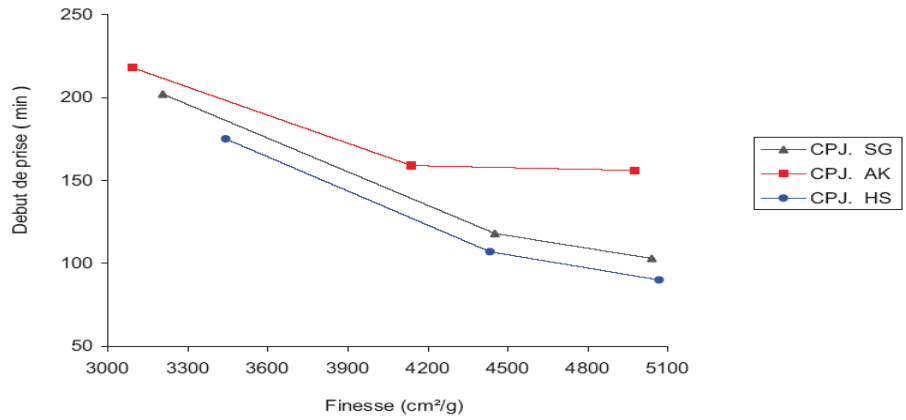


Fig I.15: Evolution du temps de début et fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture (CEMII/A :SOUR EL GHOZLANE ,AIN EL KEBIRA ,CEMII/B H. ESSAOUD) [33]

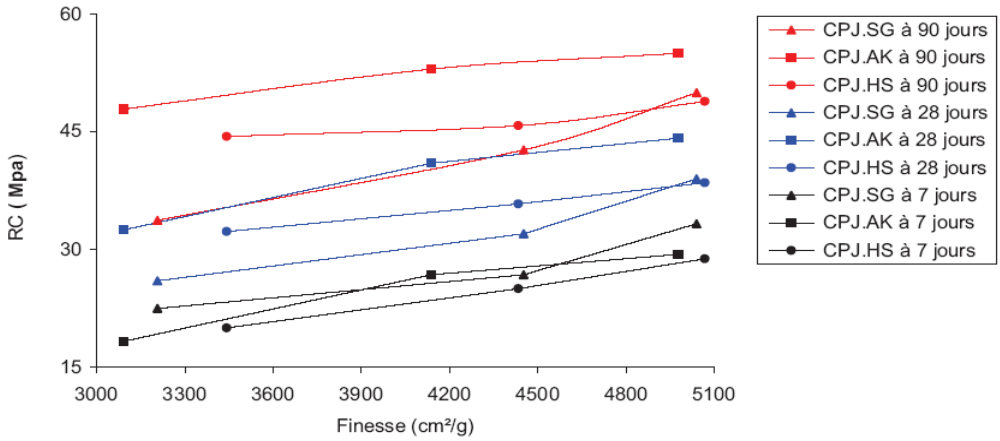


Fig I.16: évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture (CEMII/A :SOUR EL GHOZLANE ,AIN EL KEBIRA ,CEMII/BHADJAR ESSAOUD) [33]

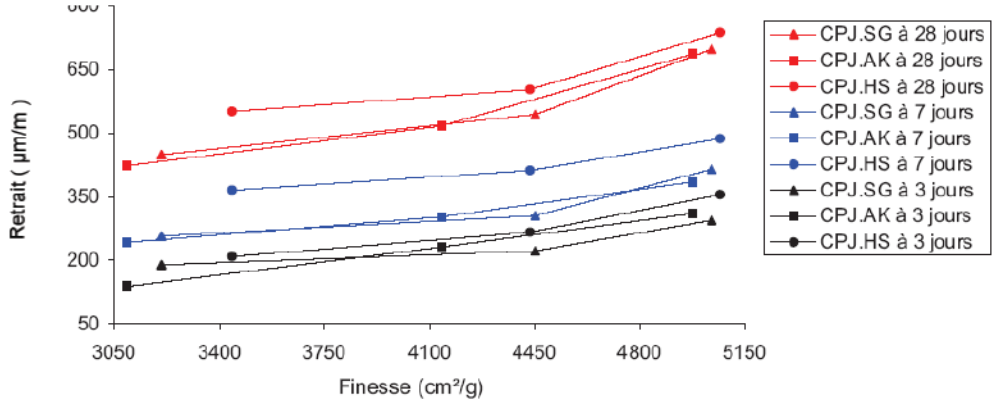


Figure I.17: évolution du retrait et gonflement des ciments en fonction de la finesse de mouture finesse de mouture (CEMII/A :SOUR EL GHOZLANE ,AIN EL KEBIRA ,CEMII/BHADJAR ESSAOUD) [33].

I.5 l'industrie de ciment en Algérie

Les pouvoirs publics en Algérie ont lancé un programme très ambitieux dans le domaine de la construction, on parle de la réalisation de plus d'un million de logement avec des divers équipements publics universitaires et éducatifs etc. …, pour la période 2010-2014. Pour la concrétisation de ce programme le pays sera appelé à consommer plus de 19 millions de tonnes de ciment par année [40].

A l'heure actuelle la production nationale du ciment est assurée principalement par le groupe étatique « Entreprise régionale des ciments ERC » et la société privée Cement Company (ou ACC) de Lafarge Ciment Algérie. Lafarge a deux usines l'une implantée

dans la wilaya de M'sila et l'autre à la wilaya de Mascara, avec une capacité d'environ 4 millions de tonnes de ciment par an [4, 40].

Le groupement ERC possède 12 usines de production de ciments et dérivés implantées le long de la partie nord du pays avec une capacité théorique de production estimée à 11,5 Millions de tonnes par année et dispose de 3 directions régionales :

L'Entreprise Régionale du ciment de l'est (ERCE) est propriétaire de 4 cimenteries :

1. Cimenterie d'Ain-Touta – Wilaya de Batna.
2. Cimenterie d'Ain El Kebira – Ain El Kebira- Setif.
3. Cimenterie de Hamma Bouziane – Wilaya de Constantine.
4. Cimenterie de Hdjar El Soud – Wilaya de Skikda.
5. Cimenterie de Tébéssa.

L'Entreprise Régionale du ciment de l'Ouest (ERCO) est propriétaire de 3 cimenteries :

1. Cimenterie de Zahana.
2. Cimenterie de Saida.
3. Cimenterie de Béni-Saf.

L'Entreprise du Ciment et Dérivé d'El Chlef (ECDE) est propriétaire de la cimenterie d'Oued Sly à El Chlef.

L'Entreprise Régionale du ciment du Centre (ERCC) est propriétaire de 3 cimenteries :

1. Cimenterie de Meftah, wilaye de Blida.
2. Cimenterie de Rais-Hamidou, wilaya d'Alger.
3. Cimenterie de Sour-El-Ghozlane, wilaya de Bouira.

Les capacités installées du groupe ERC sont représentées dans le tableau I.11.

Tableau I.11 : Capacités installées de la production annuelle du ciment du groupe ERC [4].

Groupe	Unité	Production annuelle (Tonne)
ERCE	Hadjar-El Soud	900000
	Hamma Bouziane	1000000
	Ain El Kebira	1000000
	Ain El Touta	500000
	Tebessa	1000000
ERCO	Zahana	1200000
	Béni-Saf	1000000
	Saida	500000
ECDE	Chlef	2000000
ERCC	Rais-Hamidou	400000
	Meftah	1000000
	Sor-El Ghozlane	1000000

L'industrie de ciment en Algérie utilise plusieurs ajouts qui sont peu couteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El Hadjar, le calcaire, et la pouzzolane naturelle. Une variation assez élevé du ciment produit a été constaté par Lagab et Haoua dans la cimentrie algérienne en comparaison à la celle dans les pays développés [41]. Le tableau I.12 résume les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau I.12 : Utilisations des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajout utilisé
ERCE	Ain Touta Ain El Kebira Hamma Bouziane Hdjar Aissaoui Tébessa	Pouzzolane Pouzzolane Pouzzolane Laitier Tuf
ERCC	Meftah Raïs Hamidou Sour El Ghozlane	Tuf/Calcaire Poussière Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf Zahana Saida	Pouzzolane Pouzzolane Pouzzolane
ACC	Msila Sig	Calcaire Calcaire - Pouzzolane

I.6 Hydratation de ciment

L'hydratation des ciments portland fait intervenir les réactions chimiques de ces constituants avec l'eau. Nous décrirons ici celle de silicates tricalciques, de l'aluminate tricalcique et de l'alluminoferrite tétracalciques qui gouvernent l'essentiel des propriétés du ciment. C'est une combinaison entre les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation ainsi que les impuretés présentées dans la solution solide influence beaucoup l'hydratation de chaque phases.

a) Hydratation du silicate tricalcique C_3S

Durant une courte durée (10 à 20 min), le silicate tricalcique C_3S se dissout superficiellement dés le gâchage en fournissant des ions silicates $H_2SiO_4^{2-}$, des ions OH^- et des ions de calcium Ca^{2+} qui passe en solution :

$$2Ca_3SiO_5 + 6H_2O \longrightarrow 6Ca^{2+} + 8OH^- + 2H_2SiO_4^{2-} \qquad (I.1)$$

Au bout de quelques secondes, la solution très sursaturée par rapport aux silicates de calcium hydraté précipite rapidement :

$$3Ca^{2+} + 2H_2SiO_4^{2-} + 2OH + 2H_2O \longrightarrow Ca_3H_2Si_2O_7(OH)_2,3H_2O \quad (I.2)$$

On note dans cette période:

- une évolution de la teneur en silicates ;
- une vitesse de précipitation plus grande que la vitesse de dissolution ;
- une évolution rapide du pH produit par la libération des ions OH^-.

Les hydrates ainsi obtenus sont C-S-H et la portlandite $Ca(OH)_2$. Les germes des deux espèces ont des structures très voisines, et tant que la teneur en ions silicate de la solution se maintient au dessus d'un certain niveau, c'est la germination des C-S-H qui l'emporte. Cette période sera suivie par une période dite dormante. Durant cette période, (une à quelques heurs), le dégagement de chaleur est faible mais sans jamais être nul. La consommation d'eau et de la quantité d'hydrates formés est aussi très faible et la pâte reste maniable. La solution devient de plus en plus sursaturée par rapport à la portlandite. On atteint une limite de sursaturation qui déclenche la précipitation de cet hydrate. Ceci produit un effet de « pompe à calcium » à la surface des grains en cours de réaction, et accélère leur dissolution. Cette « gâchette chimique » va déclencher une formation rapide de C- S-H. La fin de la période dormante est traduite par une diminution brutale de la concentration en calcium et OH^-, ainsi que par l'augmentation de flux thermique. La période précédente prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur, (entre 9 et 10 heures). On note une consommation d'eau et une formation des hydrates en abondance. Les cristaux de portlandite et les fibres de silicates de calcium s'enchevêtrent et remplissent les pores et les pâtes deviennent plus solides.

Par un développement de la phase précédente la couche des hydrates devient assez épaisse pour diminuer la diffusion des ions et de l'eau. L'hydratation peut poursuivre pendant des années à cause de la présence du ciment anhydre et de l'eau dans les pores capillaires.

b) Hydratation du silicate bicalcique C_2S :

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

$$2C_2S + 4H \longrightarrow 2CSH + 2CH \quad (I.3)$$

Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C_3S, mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs stœchiométrie, l'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH, alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH. Donc, une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance à long terme. Cependant, une résistance au jeune âge élevée nécessite plus de C_3S, en raison de sa grande vitesse de réaction.

Hydratation du silicate bicalcique C_3A avec le gypse :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_42H_2O$). En l'absence d'ions de sulfates se produirait un phénomène de prise rapide de ciment. En présence d'ions sulfates, la réaction sera plus lente et se déroule suivant une séquence comportant des variations de vitesse. La durée des différentes étapes réactionnelles est néanmoins plus grande dans le cas d'aluminates tricalciques.

Dans la première étape, l'aluminate tricalcique et le gypse dissolvent rapidement selon :

$$Ca_3Al_2O_6 + 2H_2O \longrightarrow 3Ca^{2+} + 2AlO_2^- + 4OH^- \qquad (I.4)$$

$$CaSO_4,2H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \qquad (I.5)$$

Cette réaction s'accompagne d'un dégagement thermique important. Les ions ainsi former se combine pour former instantanément des cristaux d'ettringite ou sel de CANDLOT (trisulfoaluminates de calcium hydraté) :

$$29H_2O + 6Ca^{2+} + 2AlO_2^- + 3SO_4^{2-} + 4OH^- \longrightarrow [Ca_2Al(OH)_6]_2\ Ca_2(SO_4),25H_2O \quad (I.6)$$

L'ettringite apparait sous forme d'aiguilles très fines ou d'oursins caractéristiques. Une continuation de formation d'ettringite et d'enchevêtrement des aiguilles peut amener un raidissement de la pâte comme c'est le cas pour la prise du plâtre. Le C_3A possède une période dormante qui ressemble un peu à celle du silicate tricalcique. La formation d'ettringite consomme trois moles de calcium par mole d'aluminates tricalciques. Après la prise du ciment, le gypse est totalement consommé. Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. La réaction est donnée par :

$$C_3A3(CaSO_42H_2O)H_{32} + 2C_3A + 4H \longrightarrow 3C_3A(CaSO_42H_2O)\ H_{12} \quad (I.7)$$

Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent de 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée. Une continuation de formation d'ettringite qui a pour rôle de diminuer l'hydratation de C_3A, ceci va amener à une période dormante qui ressemble à celle du C_3S.

c) Hydratation de l'alluminoferrite tétracalciques C_4AF:

Le C_4AF réagit d'une façon similaire à celui du C_3A, mais la réaction est beaucoup plus lente et complexe avec un dégagement de chaleur plus faible. La réaction avec l'eau sera très rapide avant la saturation en ions sulfates. Dans la première étape de la réaction, le C_4AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C_4AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminate occupent environ 15 à 20% du volume de solides dans la pâte [42]. La réaction du C_4AF participe peu au développement de la résistance [22]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

Le développement de la résistance des différents constituants du ciment est donné par la figure 1.18.

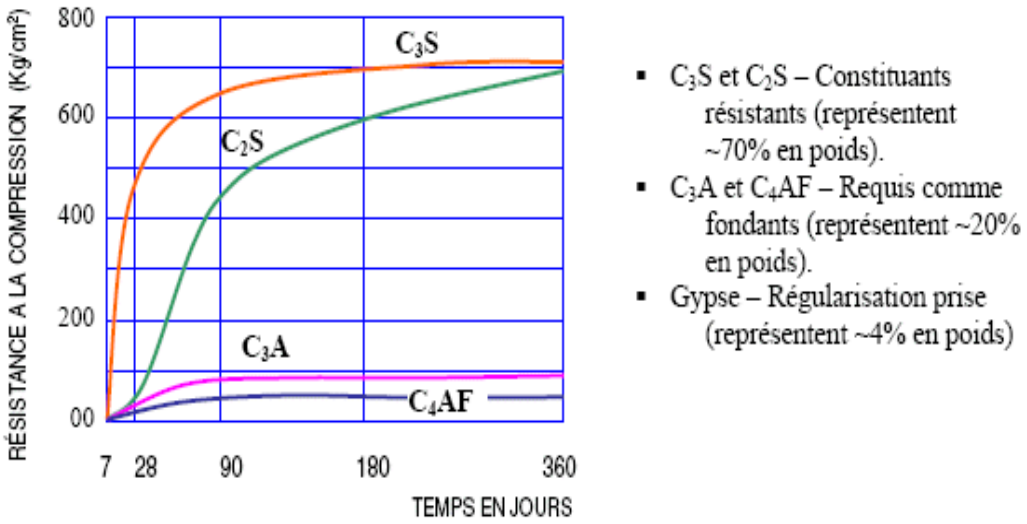


Fig. I. 18: Développement de la résistance des constituants purs de ciment [23].

d) Interaction entre les différentes phases :

En réalité l'hydratation des phases précédentes se passe en même temps (Fig. I.19) et il y a une interaction entre ces phases. Les composants minéraux du clinker et éventuellement les composants secondaires, ainsi que les impuretés ont une grande influence sur l'hydratation de chaque phase. L'activation thermique des réactions des

aluminates entraine un effet accélérateur de prise et de durcissement. De même l'élévation de pH et de concentration en calcium dû à la libération de chaux lors de l'aluminates d'une façon générale, l'ensemble des processus de couplage entre les réactions d'hydratation fait du ciment portland un système interactif , ou chaque constituant modifie le comportement global. Les réactions qui se passent lors du premier contact avec l'eau sont plus complexes, car au départ, toutes les phases réagissent rapidement avec l'eau avant que la concentration de la solution en ions sulfates soit assez importante pour influencer l'hydratation du C_3S et C_4AF. Par ailleurs, la chaux libre, la magnésie libre et l'hémihydrate réagissent aussi de façon exothermique avec l'eau. Si la quantité d'ions SO_4^{2-} en solution n'est pas suffisante, le C_3A va alors s'hydrater et donner lieu à la prise, tandis que si la concentration en ions SO_4^{2-} est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise. La '' période dormante'' prend fin avec une augmentation brusque de la quantité d'eau liée dans le C-S-H et dans l'ettringite. L'enchevêtrement des produits d'hydratation entre les grains de ciment va augmenter les résistances mécaniques de la pâte et donner naissance à la prise.

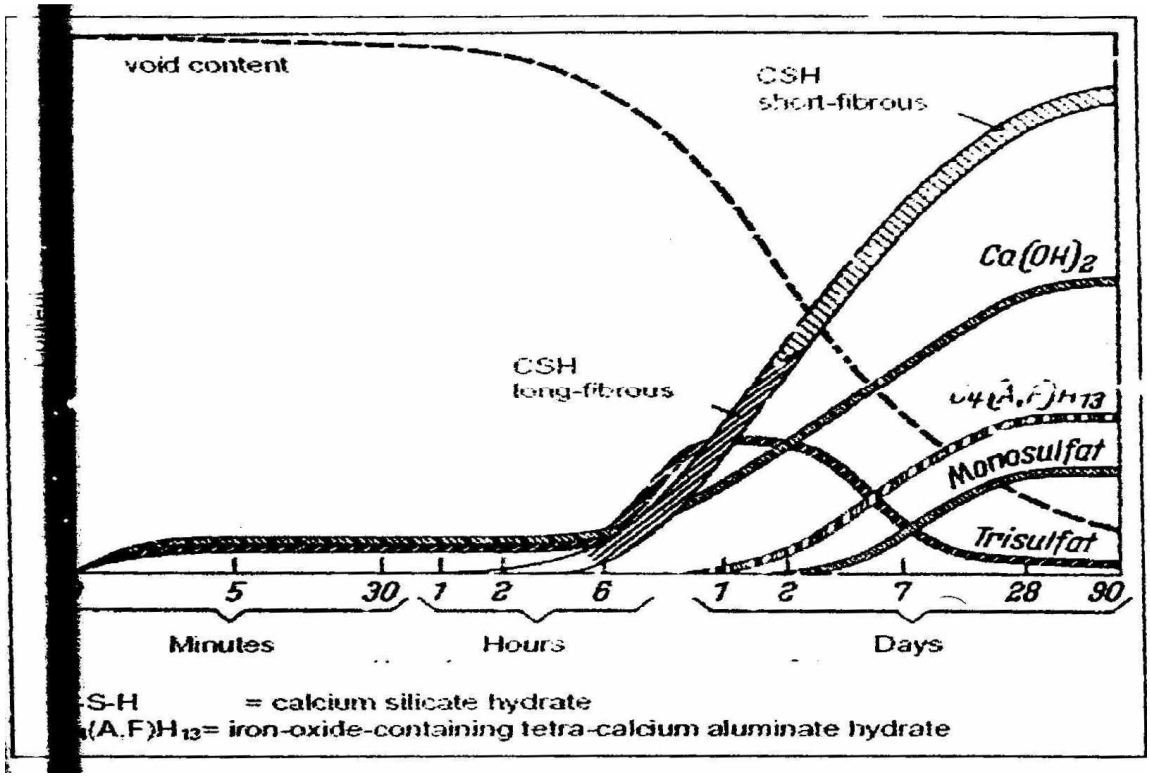


Fig. I. 19 : Représentation schématique de la formation des phases d'hydrate et le développement de structure pendant l'hydratation du ciment [43].

e) Cinétique et chaleur d'hydratation:

Les minéraux de ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes : les C_3A et C_3S s'hydratent plus vite que les C_4AF et C_2S. L'hydratation est une réaction exothermique dégageant de la chaleur et l'évolution de l'hydratation peut être suivie dans le temps comme indique la figure I.20.

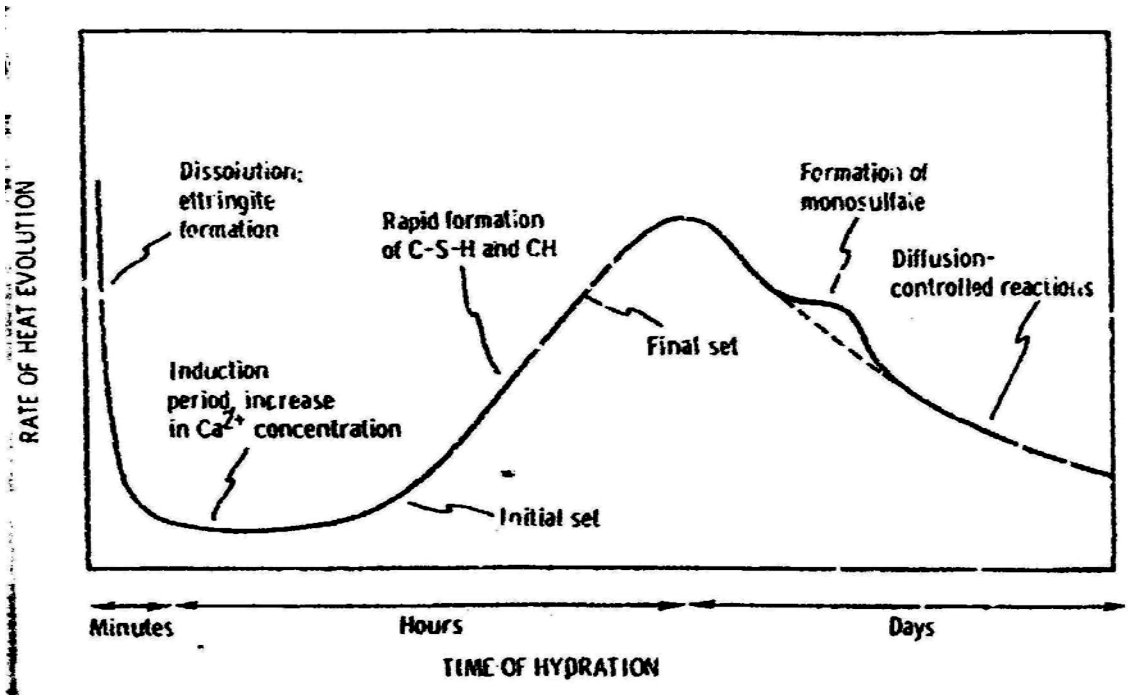


Fig. I. 20 : L'évolution du taux d'hydratation en fonction du temps.

Le premier pic est le plus haut, mais il est de courte durée. Il est suivi d'une ''période dormante'' dans laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul). Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte. Les phénomènes physiques et chimiques régissant cette phase (période dormante) sont du point de vue pratique très important, car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton. Pour un rapport E/C = 0.5, on devra placer le béton dans la structure au plus tard au milieu de la ''période dormante''.

La ''période dormante'' prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur et de la prise du ciment. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 20°C) entre 9 heures et 10 heures. Ce ne sont pas tout les ciments qui présentent un troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un ciment à un autre.

La formation de l'ettringite diminue l'hydratation du C_3A en formant une barrière de diffusion (''période dormante'') autour du C_3A, de façon analogue à celle qui est formée autour des grains de C_3S par le C-S-H. Cette barrière une fois brisée lors de la formation du

monosulfoaluminate, permet au C_3A de réagir plus rapidement. La courbe calorimétrique de l'hydratation du C_3A est semblable à celle du C_3S, quoique les réactions et le dégagement de chaleur soient différents. Par ailleurs, si la teneur en C_3A est supérieure à celle qui est nécessaire à la formation de l'ettringite, alors il y a apparition du troisième pic dans la courbe calorimétrique par formation du C_4AH_{13}. Selon la teneur en gypse, l'hydratation du C_3A peut être plus ou moins retardée. Dans le ciment, Le soufre rentre dans la structure du C-S-H. L'hydratation du C_3S est accélérée par la présence de sulfates alcalins tandis que la chaux produite accélère l'hydratation du C_3A et C_4AF.

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

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

La chaleur d'hydratation du ciment portland est généralement plus grande que celle du ciment contenant la pouzzolane naturelle [23]. La réduction de la chaleur d'hydratation dans les ciments pouzzolaniques est attribuée au retard d'hydratation de C_3A et C_4AF.

I.7 Hydratation des ciments pouzzolanique et au laitier

Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane peuvent être considérées séparément, bien que dans une certaine mesure elles se produisent en même temps. En fait la réaction pouzzolanique, qui est plus lente que la réaction d'hydratation du ciment, peut avoir lieu seulement après l'hydrolyse de C_3S et de C_2S qui forment l'hydroxyde de calcium [44]. Il est à noter que la première est une réaction de consommation de chaux, tandis que la dernière est une réaction de production de chaux (Fig. 21) [45].

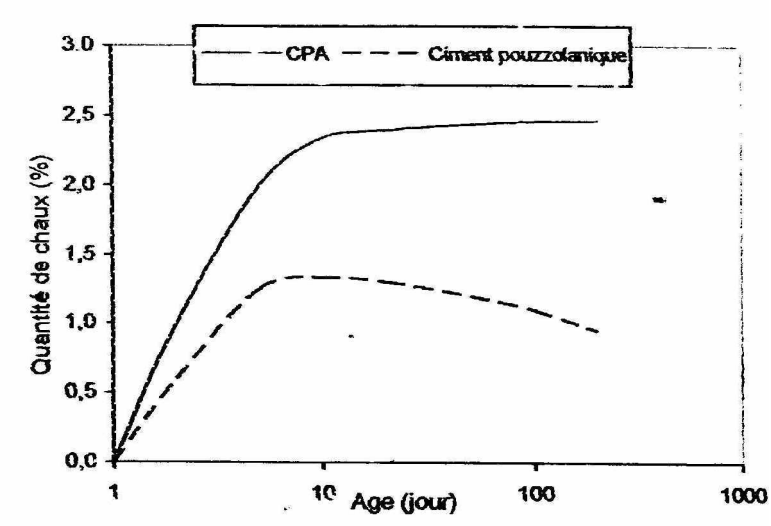


Fig. I.21 : Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté [45].

En ce qui concerne la réaction pouzzolanique, puisque les composants principaux sont SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 et CaO, les produits de l'hydratation du ciment pouzzolanique sont semblables à ceux de l'hydratation du ciment portland. Ces produits sont le silicate de calcium hydraté CSH et l'aluminate de calcium hydraté CAH qui sont les produits de la réaction entre la silice et l'alumine de la pouzzolane avec l'hydroxyde de calcium [45]. Lorsqu'un mélange de chaux – pouzzolane est en contact avec de l'eau, le $Ca(OH)_2$ s'hydrolyse d'abord et la solution atteint une valeur élevée de Ph (approximativement 12.5 à 20°C) très rapidement :

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \qquad (I.9)$$

Sous l'attaque d'OH- dans une solution de pH élevé, des modificateurs de réseau, tels que Ca^{2+}, K^+, Na^+, etc., de la pouzzolane sont dissoutes dans la solution très rapidement. Des formes de réseau de silicate ou d'aluminosilicate dans la pouzzolane sont aussi dépolymérisés et dissous dans la solution. Cependant, une plus grande fraction des modificateurs de réseau est dissoute dans la solution comme les formers de réseau dus à la faible énergie de liaison des modificateurs de réseau. Les espèces dépolymérisées de monosilicate et d'aluminate entre en solution selon les équations suivantes [45] :

$$\equiv Si\text{-}O\text{-}Si \equiv + 3OH^- \longrightarrow [SiO(OH)_3]^- \qquad (I.10)$$

$$\equiv Si\text{-}O\text{-}Al \equiv + 7OH^- \longrightarrow [SiO(OH)_3]^- + [Al(OH)_4]^- \qquad (I.11)$$

Lorsque les ions Ca^{2+} entrant en contact avec ces dernières espaces dissoutes de monosilicate et d'aluminate, le silicate de calcium hydrate CSH et l'aluminate de calcium

hydrate C_4AH_{13} se forment. Puisque les espèces dissoutes de monosilicate diffusent beaucoup plus rapidement que l'espèce dissoute d'aluminate, et une concentration plus élevée de Ca^{2+} est nécessaire pour la formation des aluminates de calcium hydratés (CAH) que pour les silicates de calcium hydratés (CSH), les CAH précipitent loin des particules de pouzzolane et les CSH précipitent autour des particules de pouzzolane. En présence des ions de sulfate, le trisulfoaluminate hydraté (Aft) se forme d'abord. Puisque la teneur en SO_3 de la pouzzolane est faible, donc Aft se transforme en monosulfoaluminate hydraté (Aft) très rapidement. Puisque la dissolution du verre d'aluminosilcate est le processus le plus lent pendant la phase initiale de la réaction pouzzolanique, elle détermine la vitesse de la réaction pouzzolanique. Après une certaine période , la surface des particules de pouzzolane est couverte par les produits d'hydratation précipités ; alors la réaction est contrôlée par la diffusion de OH^- et de Ca^{2+} par les produits précipités et dans le coté intérieur des produits précipités.

L'hydratation des laitiers conduit à la formation de C-S-H et d'aluminates ou de silicoaluminate. Les phases qui peuvent coexister en en phase aqueuse sont : C-S-H, C_2ASH_8 et $C4AH_n$ ($19 \geq n \geq 13$). Les laitiers réagissant avec l'eau plus lentement que le ciment portland mais ils peuvent être activés chimiquement. Les activateurs peuvent être soit alcalins comme la chaux, $Ca(OH)_2$, ou à base de sulfates de calcium comme le gypse $CaSO_42H_2O$. Dans le ciment au laitier, les deux types d'accélérateurs sont présents : le gypse et l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation des silicates du clinker, pour tous les ciments industriels. Le clinker s'hydrate plus rapidement que le laitier, mais ils réagissent les deux à courte terme. Il se forme très vite de l'ettringite ou l'Aft. A un âge plus avancé, l'ettringite se transforme en monosulfate ou en Aft, comme dans le ciment portland [46]. L'hydratation ne produit pas de Portlandite, il semble même qu'une partie de la Portlandite provenant de l'hydratation du ciment portland soit consommée dans un processus réactif de type pouzzolanique [47].

L'hydratation des quatre phases du clinker dans le ciment portland contenant des ajouts secondaires (cendres volantes, laitier et pouzzolane naturelle) montre que [44] :

- L'hydratation de C_3S est considérablement augmentée au très jeune âge par la présence du laitier et de la pouzzolane naturelle. Tandis que l'hydratation de C_2S a été retardée en présence des cendres volantes à 40°C et 0 60°C, mais elle a été légèrement augmentée aux températures plus basse. En présence de la pouzzolane naturelle, ils ont trouvé une accélération de l'hydratation de C_2S à 10°C, réagissant entièrement après 360 jours.

- L'hydratation de C_3A a été accélérée dans le ciment contenant les cendres volantes, réagissant complètement après 14 jours. Pour le ciment à base de pouzzolane naturelle, les taux d'hydratation étaient aussi plus élevés.
- L'hydratation de C4AF a été nettement accélérée par la présence du laitier ayant entièrement réagi après seulement 180 jours. La pouzzolane naturelle et les cendres volantes ont aussi augmenté l'hydratation de ferrite mais à un moindre degré.

I.8 Durabilité des bétons

La durabilité s'explique, en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux des bétons [48]. C'est-à-dire, elle est définie par la capacité du matériau de résister aux actions climatiques, aux attaques chimiques ou à d'autres processus de détérioration. Dans un autre sens, le matériau béton sera durable à long terme quand il garde ces caractéristiques physiques et performances mécaniques sous des conditions de services existantes et de l'environnement. Les indicateurs de durabilité sont principalement la perméabilité, la porosité, l'absorption d'eau et la résistance à l'attaque sulfatiques.

I.8.1 Perméabilité

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité du béton et celle de la pâte de ciment hydraté est liée aux caractéristiques du réseau de pores capillaires. Les principales caractéristiques de ce réseau qui influencent sur la perméabilité sont la porosité, la tortuosité et la connectivité et le degré de saturation.

I.8.2 Porosité

La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés. La porosité du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton, comme les caractéristiques mécaniques, la perméabilité (eau, ions, gaz) et la durabilité. Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue (Fig. 1.22).

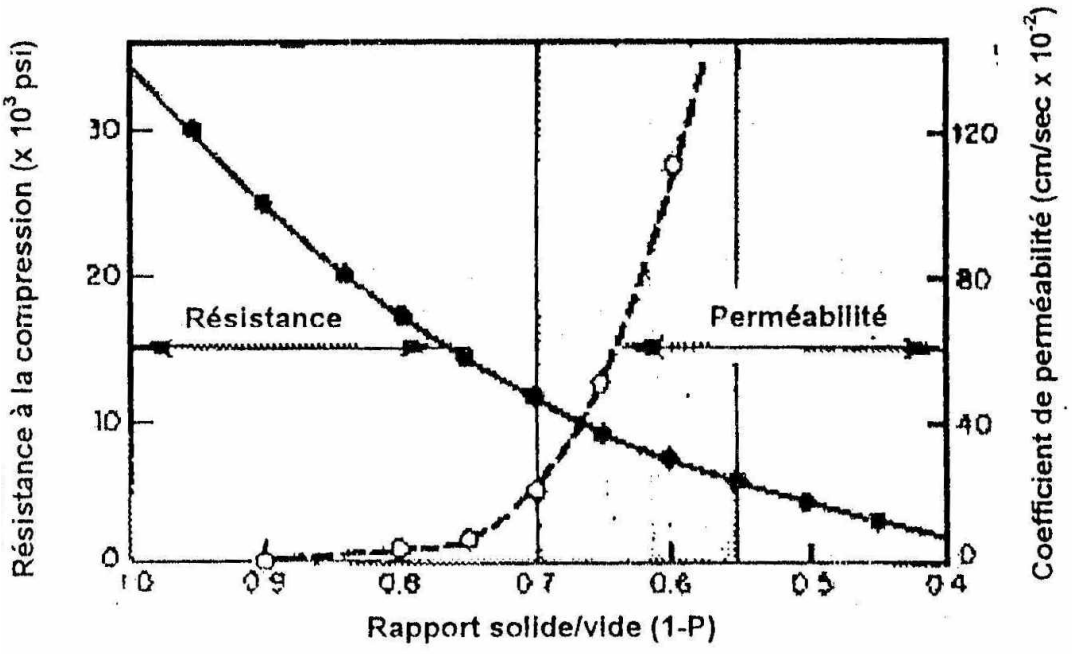


Fig. I.22 : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [22].

A mesure que progresse la réaction entre l'eau et le ciment, des hydrates se forment à la surface des grains de ciment où précipitent dans les espaces intergranulaires. Après un certain temps, tous les espaces entre les grains seront segmentés par une paroi d'hydrates (la porosité capillaire devient discontinue), ce qui produit une chute brutale de la perméabilité. Le tableau I.13 présente la durée de l'hydratation nécessaire pour produire un réseau de pores discontinu, en fonction du rapport E/C de la pâte.

Tableau I.13 : Relation entre le rapport E/C et le temps de segmentation du réseau capillaire des pâtes de ciment portland [22].

Rapport E/C	Durée de l'hydratation
0.40	3 jours
0.45	7 jours
0.50	14 jours
0.60	6 mois
0.70	1 an
> 0.70	impossible

I.8.3 L'absorption d'eau dans le béton

L'absorption est la tendance du béton de prendre l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel. L'eau liquide est tirée dans ces pores par la tension superficielle, juste comme l'eau se lèvera dans un capillaire de verre. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le béton sec ou partiellement sec prenne l'eau. Si l'eau contient des produits chimiques nocifs, ceux-ci pénètrent également dans le béton [48] [49]. Plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande. Le plus simple mesure directe de la capacité du béton d'absorber les fluides est sa sorptivité S, qui est défini par l'équation suivante [50].

$$M(t) = S.\sqrt{t} \qquad (I.14)$$

Où M est le fluide absorbé selon la normale à normale à la surface exposée (la masse du fluide/ (densité x surface)), et S est la sorptivité du fluide (profondeur /temps$^{1/2}$). Pour déterminer la sorptivité S, M est tracée en fonction de $\sqrt{t}$, ensuite, S est calculée à partir de la pente de la relation linéaire entre M et$\sqrt{t}$. L'absorptivité, qui est un indice de transport d'humidité dans les spécimens insaturés, a été identifiée comme un indice important de la durabilité du béton, parce que :

- La méthode d'essai employée pour sa détermination reflète la manière dont la plupart des bétons seront pénétré par l'eau et d'autres agents nuisibles ;
- C'est une mesure particulièrement bonne de la qualité des bétons extérieurs, qui régit la durabilité liée à la corrosion d'armature.

Martys et Ferraris [51] ont prouvé que le coefficient de sorptivité est essentiel pour prévoir la durée de vie du béton comme matériau de construction et pour améliorer ses performances.

Les additions minérales ont un rôle bénéfique sur la réduction de l'absorption capillaire du béton (Fig. 1.23 et 1.24). Tsivilis et al. [52] ont étudié l'effet de l'addition du calcaire sur la sorptivité des bétons. Ils ont aussi constaté que le béton contenant le ciment au calcaire a donné valeurs de sorptivité légèrement plus basses, comparées au béton contenant le ciment sans ajout. Ils ont trouvé que la sorptivité du béton contenant le ciment au calcaire a varié de 0.220 à 0.238 mm/min$^{0.5}$ avec l'augmentation du niveau de substitution du calcaire, alors que le béton contenant le ciment sans ajout a présenté une sorptivité de 0.237 mm/min$^{0.5}$.

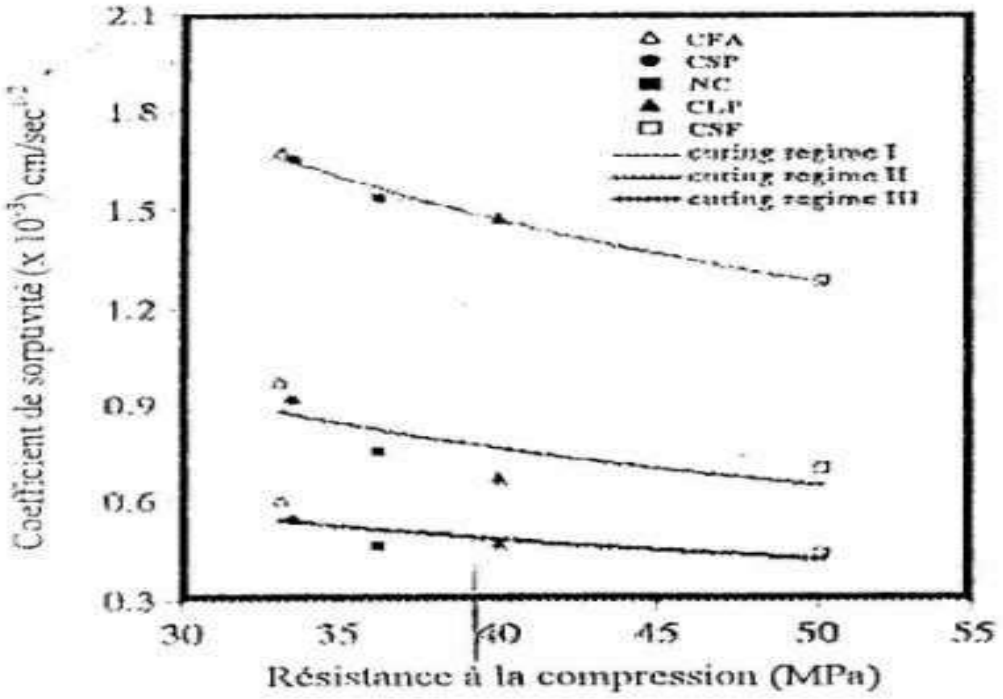


Figure I.23: Coefficient de sorptivité en fonction de la résistance à la compression (béton série A) [53].

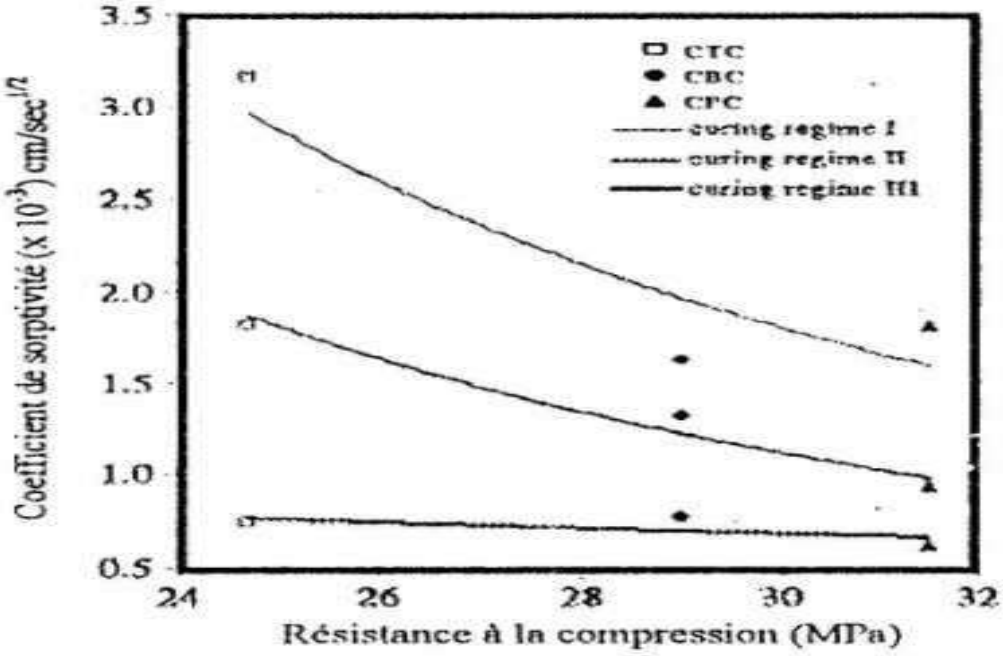


Figure I.24 : Coefficient de sorptivité en fonction de la résistance à la compression (béton série B) [53].

La substitution partielle du ciment par le métakaolin Mk réduit aussi la pénétration de l'eau dans le béton par l'action capillaire. L'absorption d'eau du béton par immersion totale est légèrement augmentée en béton contenant le Mk [54].

I.8.4 Attaque par les sulfates

L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre l'ion sulfate et l'aluminate de l'aluminate de calcium hydraté, et/ou les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durcie. Les produits qui résultent de ces réactions sont l'hydrate de sulfoaluminate de calcium communément appelé ettringite et l'hydrate de calcium mieux connu sous le nom de gypse. Les volumes de ces solides sont beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance, il en résulte des contraintes qui peuvent détériorer la pâte finalement désintégrer le béton.
Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ($CaSO_4.2H_2O$) ou de l'anhydrite ($CaSO_4$), on peut rencontrer des concentrations élevées (>5%) [27]. Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^{-2}. Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et l'humidité avec formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes). Les sources de sulfates peuvent aussi être internes [22]:

- Contamination des granulats par du plâtre
- Granulats gypseux
- Sulfures dans certains granulats

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques [22]:

- Expansion ;
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les mécanismes de destruction sont fonction de la concentration et de la source des ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs. Elle peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface. Dans le cas de l'attaque externe, les ions de sulfate doivent pénétrer dans le béton pour lancer la réaction. N'importe quelle expansion provoquée par la pénétration de ces sulfates

peut causer la détérioration, qui accélère la pénétration de plus d'ions de sulfate. Le taux de l'attaque externe est une fonction du temps d'exposition. D'autre part, dans le cas de l'attaque interne, les ions de sulfate existent à l'intérieur du béton dés le mélange. La quantité d'ions de sulfate diminue pendant que la réaction chimique procède, et donc le taux d'attaque interne tend à ralentir avec le temps.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates [22]:

(i) Formation de gypse secondaire

Substitution ionique entre la portlandite et les sulfates.

Dans le cas du sulfate de sodium :

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH \qquad (I.15)$$

$$NaOH : \text{Alcalinité élevée} \longrightarrow \text{stabilisation des C-S-H.}$$

$CaSO_4.2H_2O$: produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

(ii) Formation d'ettringite secondaire

- À partir du C_3A anhydre résiduel :

$$C_3A + 3\,CaSO_4.2H_2O + 26H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_20 \qquad (I.16)$$

- À partir des aluminates hydratés (Monosulfoaaluminates) :

$$C_3A.CaSO_4.18H_2O + 2Ca(OH)_2 + 2SO_4 + 12H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \quad (I.17)$$

Le sulfate de magnésium est très agressif (double action)

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 \longrightarrow CaSO_4 + Mg(OH)_2 \quad (I.18)$$

($Mg(OH)_2$ est caractérisée par une faible solubilité et un faible pH)

$$C_3A + 3CaSO_4.2H_2O + 26H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \text{ (expansive)} \quad (I.19)$$

Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H:

$$C\text{-}S\text{-}H + MgSO_4 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + (C, M)\text{-}S\text{-}H \text{ (faiblement cohésif)} \quad (I.20)$$

On peut remarquer que l'attaque des sulfates engendre deux types de produits, un gypse secondaire qui est peu expansive et l'ettringite secondaire qui représente la cause principale de la détérioration des mortiers et béton exposés aux milieux sulfuriques.
Plusieurs chercheurs [55-61] ont montré que l'addition des pouzzolanes comme ajout au ciment peut améliorer, d'une façon remarquable, la résistance aux sulfates des mortiers et bétons.

Mangat et Khatib [56] ont étudié l'influence des cendres volantes, fumée de silice et laitier sur la résistance aux sulfates des bétons. Ils ont trouvé que la résistance au sulfate de la matrice du béton s'améliore considérablement avec la substitution du ciment portland ordinaire par 22 et 32% de cendres volantes, de 5 à 15% de fumée de silice, et 80% de laitier granulé de haut fourneau.

Yeginobali et Dilek [58] ont évalué la résistance aux sulfates de deux types de fumées de silice des fours du ferrosilicium (FeSi) et de silicoferrochromium (SiFeCr) en utilisant deux méthodes d'essais ASTM C452 (mesure de l'expansion des barres de mortier) et ASTM C1012 (mesure de changement de longueur des barres de mortier) (Fig 1.25). Ils ont utilisé des spécimens de mortier qui ont été immergés séparément dans des solutions de 10% Na_2SO_4 et 8.4% $MgSO_4$. Après avoir été soumis au changement de masse périodique, ces spécimens ont été testés pour la résistance à la compression à l'âge de 60 semaines pour évaluer leur détérioration relative vis-à-vis des spécimens gardés dans l'eau. Ils ont trouvé que les spécimens contenant la fumée de silice ont eu un plus petit changement de masse. Dans les spécimens immergés dans la solution $MgSO_4$ la perte de masse s'est produite presque au début. L'addition de fumée de silice a augmenté l'importance des pertes de masse.

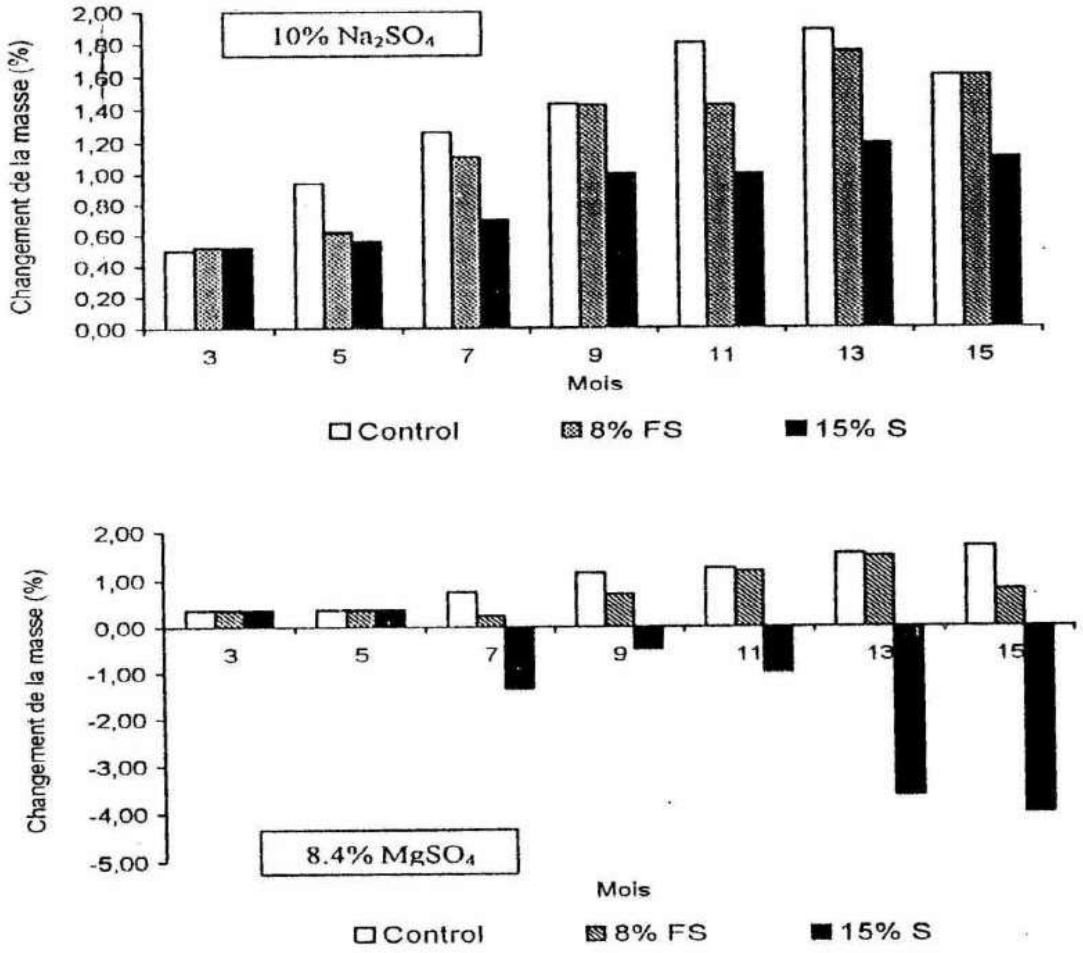


Fig. I.25: Changement de masse des spécimens immergés dans les solutions de sulfates [58].

Janotka et Kraj [90] ont étudié la résistance aux sulfates de trois types de ciments : ciment portland type CEM I 42.5 (PC), ciment résistant aux sulfates (SRPC), et un ciment à base de zéolite naturelle (PPC). Ils ont laissé les mortiers dans l'eau pure et dans une solution de 5% $NaSO_4$ pendant 365 jours. Ils ont constaté une diminution de 32.6% de la résistance à la compression des mortiers de PC immergé pendant 365 jours dans la solution NaSO4 comparée à ceux conservées dans l'eau. En revanche, ils ont observé une augmentation de 10.5% et 2.6% de la résistance à la compression des mortiers de SRPC et de PPC respectivement (Fig. 1.26).

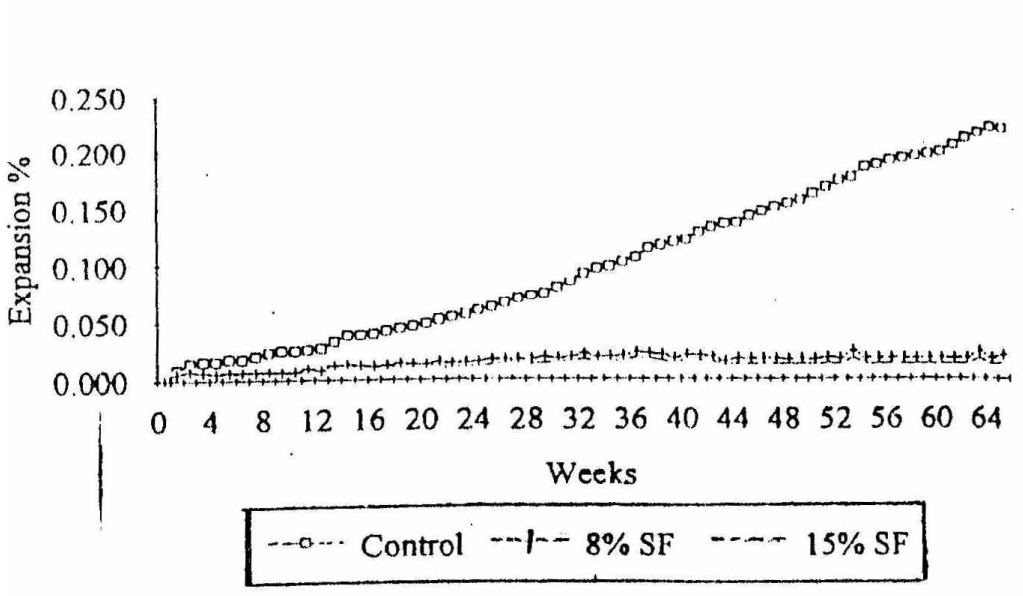


Fig. I.26 : Résultats des essais ASTM C1012 sur mortier [59].

I.9 Conclusion

La qualité d'un clinker dépend de sa composition chimique et minéralogique et par conséquent de la qualité de la matière première (argile et calcaire). L'addition d'ajouts cimentaires modifie le mécanisme d'hydratation et influe les différentes propriétés du ciment et béton à l'état frais et durcie. Par conséquent, il est indispensable de connaître les différentes propriétés du ciment avant son utilisation pour fabriquer le béton. En Algérie, différents ajouts sont utilisés dans la fabrication du ciment et par conséquent leurs effets est variable. L'objectif de cette étude et de caractériser les ciments disponibles sur le marché algérien.

Chapitre II

Matériaux utilisés

et essais réalisés

II.1 Introduction

Les matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes de mortiers et bétons ainsi que les essais réalisés et les variables étudiées sont présentés dans ce chapitre.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Ciments

Nous avons utilisé quinze ciments portland composés provenant de différentes cimenteries dont treize du territoire national algérien et deux étrangères comme l'indique le tableau II.1.

Tableau II.1 : Ciments portland composés utilisés.

provenance	Groupe/Société/Usine	Unité	Type de ciment
ERC	ERCE (Est)	Hadjar-El Soud	CEMII/A 42.5
		Hamma Bouziane	CEMII/A 42.5
		Ain El Kebira	CEMII/A 42.5
		Ain El Touta	CEMII/A 42.5
		Tebessa	CEMII/A 42.5
	ERCO (Ouest)	Béni-Saf	CEMII/A 42.5
		Saida	CEMII/A 42.5
	ECDE (El Chlef)	Chlef	CEMII/A 42.5
	ERCC (Centre)	Rais-Hamidou	CEMII/A 32.5
		Meftah	CEMII/A 42.5
		Sor-El Ghozlane	CEMII/A 42.5
ACC	ACC (Algérian Cement Company)	M'sila	CEMII/B 42.5N
		Maascar	CEMII/B 42.5N
Etrangère	ROTA Usine de Bizerte	Turque	CEMII/A 42.5
		Bizerte Tunisie	CEMII/A 42.5

II.2.2 Sable

Nous avons utilisé un sable normalisé conformément à la norme CEN EN 196-1 [62] pour la confection des éprouvettes de mortier destinés aux essais de retrait, essais d'absorption et essais de durabilité (résistance aux sulfates). En ce qui concerne la confection des éprouvettes de béton, nous avons utilisé un sable d'oued de Baghlia (Fig. II.1). L'analyse granulométrique du sable à été réalisé conformément à la norme NFP 18-560 [63] dont les résultats sont donnés dans la figure II.2. Les résultats de ses propriétés physiques, de l'équivalent de sable et de son module de finesse sont présentés dans le tableau II.2. Les résultats de l'analyse granulométriques de deux classes du gravier sont illustrés sur la figure II.5.



Fig. II.1 : Sable de Baghlia

Tableau II.2 : Masses volumiques, équivalent de sable et module de finesse du sable de Baghlia utilisé.

Masse volumique absolue (kg/m^3)		2602.00
Masse volumique apparente (kg/m^3)		1597.30
Equivalent de sable (%)	E.S à vue	90.47
	E.S à piston	87.30
Module de finesse (M.F)		2.48

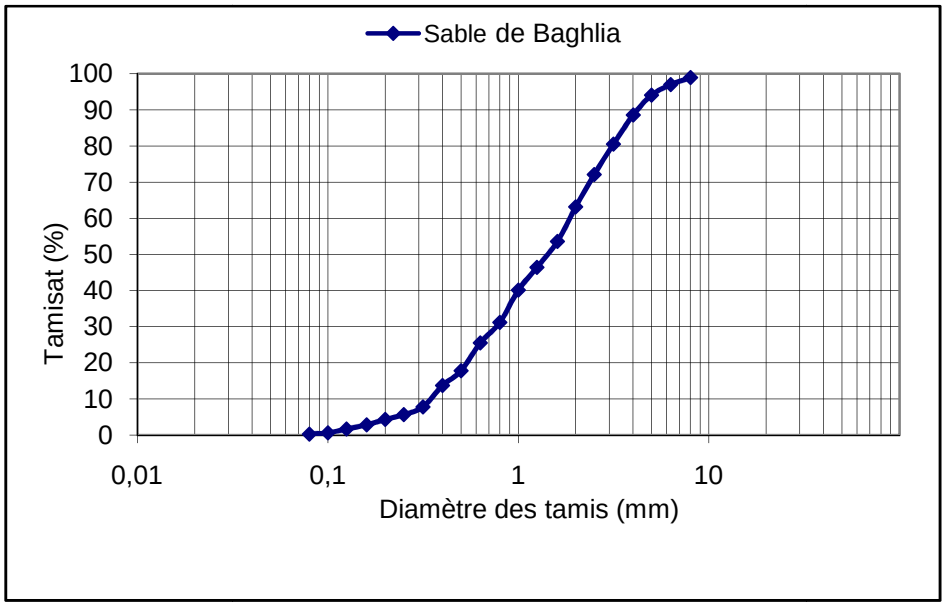


Fig. II.2 : Courbe granulométrique du sable de Baghlia.

II.2.3 Gravier

Deux classes granulaires (3/8) et (8/15) ont été utilisées pour la confection des éprouvettes en béton (Fig. II.3 et II.4). Le gravier concassé d'origine basaltique provient de la station de concassage de Kaf El Assel (Beni Slimane), Wilaya de Médéa. Pour éliminer les impuretés, les graviers ont été lavés plusieurs fois avant leurs utilisations.



Fig. II.3 : Gravier de Kaf El Assel (3/8).



Fig. II.4 : Gravier de Kaf El Assel (8/15).

Les masses volumiques absolues et apparentes des deux classes de graviers utilisés ont été déterminées conformément aux normes NFP 18-554 [64] et 18-555 [65] et sont données dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Masses volumiques des deux classes des graviers utilisés.

Classe	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2631	2637
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1380	1331

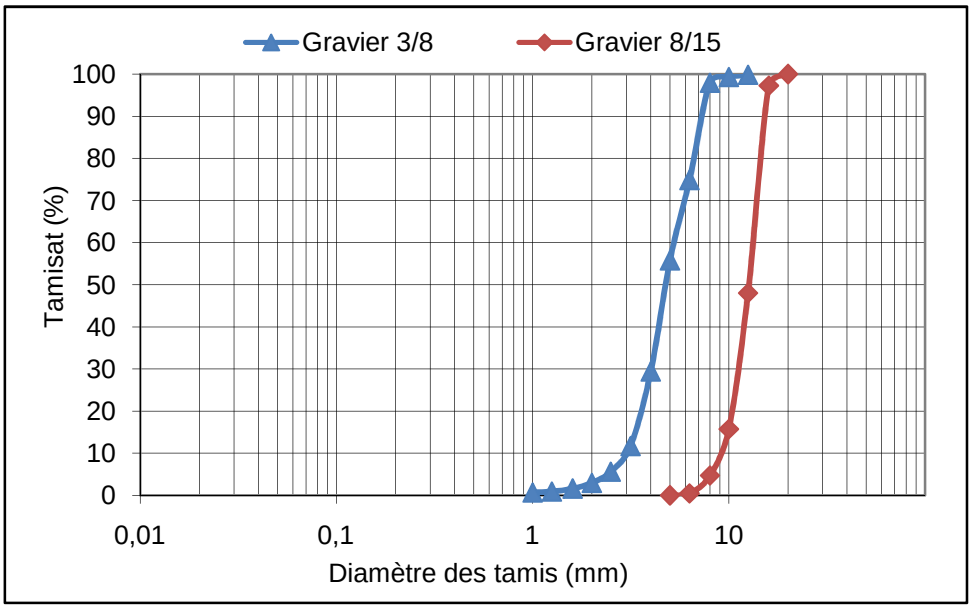


Fig. II.5: Courbes granulométriques des deux classes du gravier (3/8 et 8/15) utilisées.

II.2.4 Eau

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable du robinet, propre et exempte d'impuretés.

II.3 Caractéristiques physiques

II.3.1 Essai sur le ciment anhydre

II.3.1.1 Mesure de la Finesse

L'objectif de l'essai est de déterminer la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. Elle est exprimée en cm^2/g, conformément à la norme EN 196-6 [66].
Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une quantité de poudre de ciment anhydre. Plus la surface massique de cette poudre est importante, plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface massique est proportionnelle à la racine

carrée du temps ($t^{½}$). Les mesures ont été effectuées conformément à la norme EN 196-6 [66] dans une salle maintenue à une température de 20°C± 2°C et une humidité relative de 65% par le perméabilimètre de Blaine (Fig. II.6).



Fig. II.6: Perméabilimètre de Blaine.

La surface spécifique du ciment S_P est Calculée par la formule suivante :

$$Sp = \frac{K \cdot e^{3/2} \cdot t^{1/2}}{\rho (1 - e) \cdot (0.1\,\eta)^{1/2}} \quad (cm^2/g) \qquad \text{(II.1)}$$

Avec : k : constante de l'appareil.

η : la viscosité de l'air à la température de l'essai.

e : la porosité est définie comme le volume d'air occlus contenu dans le lit de ciment compacté rapporté au volume totale.

ρ : la masse volumique absolue du ciment.

II.3.1.2 Masses volumiques

a) Masse volumique absolue

La masse volumique absolue du ciment (ρ_c) est déterminée selon la norme NF EN 196-6 [66] et calculée selon la formule suivante :

$$\rho_c = \rho_t \; m_c / m_t \qquad \text{(II.2)}$$

ρ_t : masse volumique du toluène.

m_c : masse du ciment.

m_t : masse du toluène.

b) Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, donc de la matière qui constitue ce corps, y compris les vides qu'elle contient.

On remplit un récipient correspondant à une mesure unitaire et l'on détermine la masse du contenu par pesée comme l'indique la figure II.7.



Fig. II.7: Dispositif de mesure de la masse volumique apparente.

II.3.2 Essai sur la pâte de ciment durcissant

II.3.2.1 Consistance normale

La consistance de la pâte de ciment est caractérisée par sa plasticité. Pour évaluer cette consistance, l'appareil de Vicat (Fig. II.8) est utilisé conformément à la norme NF P 15 – 473 [67]. Pour cela la consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La consistance normale est obtenue quand la tige s'enfonce à une distance de 6 mm ± 1 de la base du moule tronconique qui contient la pâte du ciment. Ainsi la quantité d'eau nécessaire pour obtenir cette consistance est déterminée par tâtonnement successif. La consistance normale s'exprime en pourcentage de l'eau utilisée par rapport à la quantité de ciment (500 g).



Fig. II.8 : Appareil de Vicat.

II.3.2.2 Temps de prise

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance des pâtes de consistance normalisée. L'appareil utilisé est celui de Vicat équipé d'une aiguille d'un diamètre de 1.13 mm. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'arrête à une distance de 4 ± 1 mm du fond du moule on dit que le début de prise est atteint. Ce moment mesuré à partir du malaxage est appelé le temps de début de prise. Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5mm conformément à la norme EN 196-3 [68].

II.3.2.3 Expansion (stabilité)

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptibles de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation, les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment. La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

Après remplissage par une pâte de consistance normalisée conformément à la norme EN 196-3 [68], les moules sont conservés 24 heures dans l'armoire humide. Au bout de ce temps il convient de mesurer à 0.5 mm prés l'écartement A entre les pointes des aiguilles (Fig. II.9). Les moules sont alors entreposés dans le bain d'eau à 20°C qui doit être porté à l'ébullition en 30 mn ±5 mn . Ce bain sera maintenu à la température d'ébullition pendant 3 h ±5 min. Soit B l'écartement entre les pointes des aiguilles au bout de ce temps. Soit C l'écartement lorsque le moule, après refroidissement, est revenu à la température de 20°C.

La stabilité est caractérisée par la valeur C-A exprimé en mm prés.

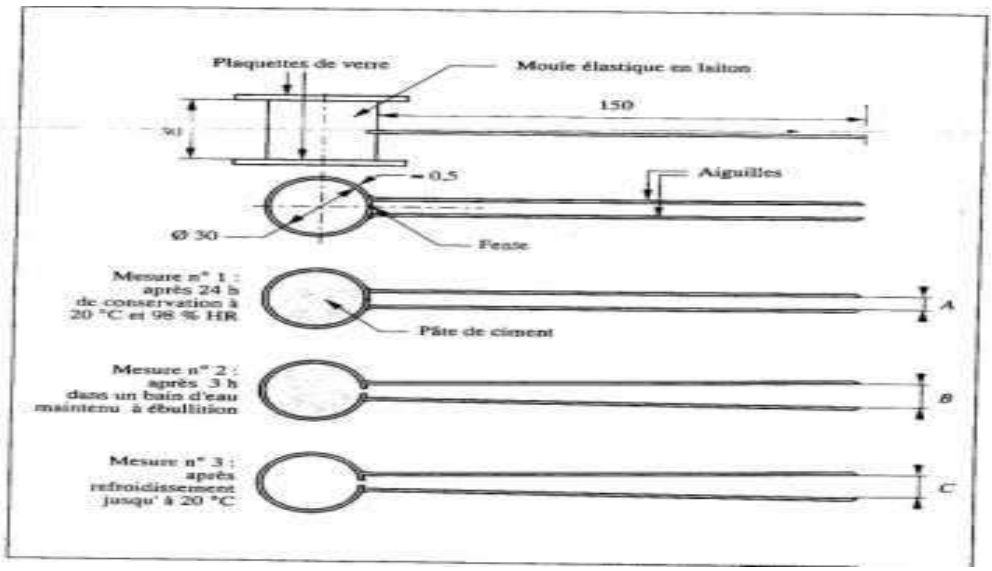




Fig. II.9: Appareil de mesure de stabilité du ciment (Chatelier).

II.4.Essais mécaniques

II.4.1.Préparation du mortier

La composition du mortier normalisé utilisé est réalisée conformément à la norme EN 196-1 [62]. Chaque gâché pour trois éprouvettes comporte 450 g de ciment, 1350 g de sable et 225 g d'eau. Les matériaux ont été malaxés mécaniquement au moyen d'un malaxeur à axe vertical (Fig. II.10) selon la norme NF P 15- 471 [69].



Fig. II.10: Malaxeur à axe vertical du mortier.

II.4.2 Essai de consistance sur mortier par maniabilimètre

La consistance est caractérisée par le temps t que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration conformément aux normes NF P 18-452 [70] et NF P 18-437 [71] dans le maniabilimètre (Fig. II.11). La procédure de fonctionnement du maniabilimètre à mortier est illustrée dans la figure II.12.



Fig. II.11: Maniabilimètre à mortier.

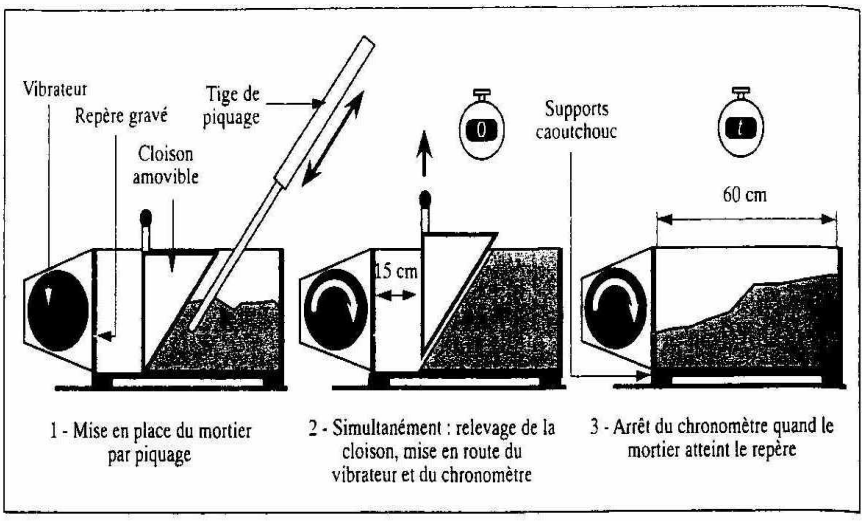


Fig. II.12: Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

II.4.3 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour la confection des mortiers sont de forme prismatique 40 x 40 x 160 mm. Les éprouvettes sont moulées et vibrées immédiatement après la préparation du mortier.

Après le démoulage, Les éprouvettes ont été conservées dans un bac d'eau à une température moyenne de 20 ± 2 °C avec une humidité relative de 100%.

II.4.4 Essai de résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction par flexion est effectuée sur des éprouvettes 40 x 40 x 160 mm par le biais de l'essai de flexion trois points comme le montre la figure II.13. Les essais sont effectués selon la norme NF EN 196-1 [62]. La vitesse du chargement est de 100 N/s en flexion.

II.4.5 Essai de résistance à la compression

Les essais de compression ont été effectués selon la norme NFP 15-451 [72]. Les demi-prismes après rupture en flexion de l'éprouvette ont été testés en compression tels que l'illustre la figure II.14. La vitesse du chargement est de 1.5 N/m^2s en compression.



Fig. II.13: Dispositif de l'essai de flexion trois points.



Fig. II.14: Dispositif de l'essai de compression.

II.4.6 Mesure du retrait

Les mesures du retrait ont été effectuées selon la norme NF P 15-433 [73]. Les éprouvettes de mortier 40 x 40 x 160 mm sont munies à leurs deux extrémités de plots en laiton comme l'indiqué la figure II.15 et conservées à une température de 20 °C et une humidité relative supérieure à 50%.

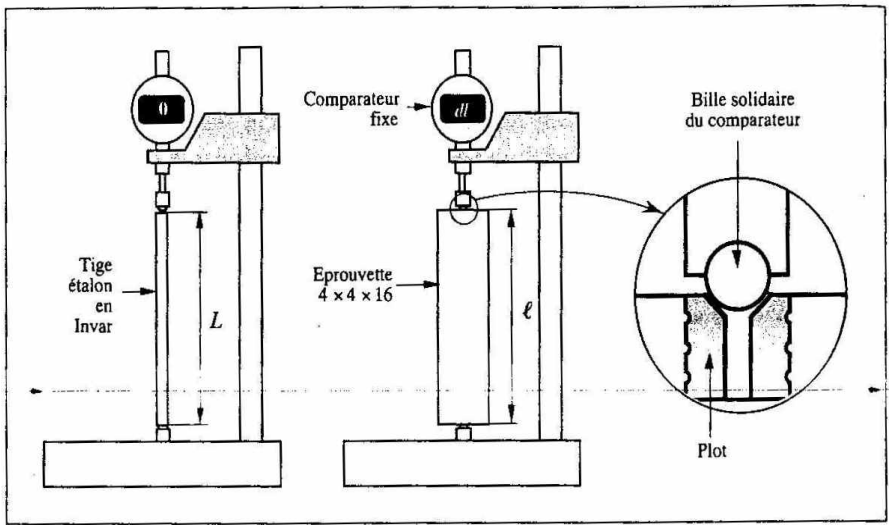




Fig. II. 15 : Appareillage pour la mesure du retrait.

II.5 Essai de porosité par immersion totale

Cet essai consiste à calculer la capacité d'absorption d'eau massique des mortiers qui reflète assez bien la porosité totale. Pour cela, trois échantillons ont été récupérés après l'essai d'écrasement des éprouvettes. Les échantillons ont été préalablement conditionnés par étuvage à 103°C pour déterminer la masse sèche (M_1). Ensuite immergés dans l'eau froide et portés à l'ébullition pendant deux heures afin de déterminer la masse M_2.

La porosité par immersion totale de l'échantillon est déterminée par [74] :

$$P(\%) = \frac{M2 - M1}{M2} \qquad \text{(II.3)}$$

II.6 Résistances aux sulfates

Les mortiers ont été confectionnés selon la norme EN 196-1 [62]. Après malaxage des différents constituants, les mortiers ont été ensuite coulés dans des moules prismatiques 25 x 25 x 280 mm et vibrés grâce à une table vibrante. Après 24 heures, elles ont été démolies et conservées dans l'eau (HR = 100 %, T = 20°C) pendant 60 jours avant d'être soumises à l'immersion dans les deux solutions sulfateuses 5 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et 5 % de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) (Fig. II.16). Les solutions de sulfates ont été renouvelées chaque mois.



Fig. II.16 : Mise en solution des éprouvettes dans les solutions Na_2SO_4 et $MgSO_4$.

II.6.1 Expansion

Les mesures de l'expansion des éprouvettes de mortier ont été déterminées selon la norme ASTM C-102 [75] par l'extensomètre montré sur la Fig. II.17.



Figure II.17: L'extensomètre.

II.6.2 Perte en masse

La mesure de perte en masse des éprouvettes en mortier ont été évaluée par l'expression suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} x100 \qquad \text{(II.4)}$$

Où :

M_1 : la masse en gramme des éprouvettes avant l'immersion.

M_2 : la masse en gramme des éprouvettes après l'immersion.

II.7. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence x ainsi que la détermination des caractéristiques minéralogiques ont été réalisés au laboratoire CETIM de Boumerdes. Par ailleurs, les essais de DRX ont été réalisés au niveau du laboratoire de l'université de Laghouat.

II.7.1 Caractéristiques chimiques

II.7.1.1 Analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X

L'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X utilisée selon les modalités de la norme NF P 15-467 [76] nous a permis d'obtenir les résultats de la composition chimique des ciments (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, SO_3, K_2O, Na_2O , P_2O_5 et TiO_2).
Cette méthode permet de mettre en évidence de façon quantitative ou semi-quantitative, les éléments chimiques présents dans l'échantillon et dont la masse atomique est supérieure à celle de l'élément Oxygène. Le principe de cette méthode peut être explicité comme suit :

Le rayonnement X primaire émis par un tube est envoyé sur l'échantillon à analyser. L'interaction rayon X incident avec l'échantillon absorbant se traduit par l'ionisation de ce dernier. Compte tenu de la haute énergie du rayonnement incident (50 keV), les ionisations se traduisent par l'éjection d'électrons de la couche K de l'échantillon, qui se trouve ainsi dans un état excité. La durée de vie de ces atomes ionisés est très brève (< 10-11 s), ils reviennent dans leur état fondamental : les lacunes sur la couche K sont comblées par des électrons provenant de couches plus éloignées du noyau (couches L ; M…). Ces transitions entre niveaux d'énergie se traduisent par des libérations d'énergie quantifiées auxquelles correspondent les raies caractéristiques d'un élément chimique. La méthode utilisée durant l'étude est de type semi-quantitatif, avec une erreur relative inférieure à 20 %, basée sur l'interprétation des hauteurs de pics de fluorescence X caractéristiques des divers éléments chimiques. L'appareil Fluorescence X utilisé est de type : Spectromètre de fluorescence X : AGIX PRO, Marque : PANalytical.

II.7.1.2 Essais chimiques

a) Détermination de la perte au feu

La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante (air). Par calcination à l'air à (975 ± 25)°C le gaz carbonique et l'eau sont chassés et les éléments oxydables éventuellement présents sont oxydés. Une correction de l'influence de cette oxydation sur la perte au feu est indiquée. Conformément à la norme NA235 [77], la perte au feu est calculée en pourcentage par la formule suivante :

$$Perte\ au\ feu = \frac{(\mathrm{mi}-\mathrm{mc})}{\mathrm{mi}} \mathrm{x}100 \qquad \text{(II.5)}$$

Où :

mi : est la masse de la prise d'essai initiale, en grammes ;

mc: est la masse de la prise d'essai calcinée, en grammes ;

b) Détermination des résidus insolubles

Le résidu insoluble des ciments est obtenu au moyen d'une attaque par une solution d'acide chlorhydrique. Le résidu de cette attaque est repris par une solution bouillante de carbone de sodium. Le résidu est dosé gravimétriquement après calcination. Conformément à la norme NA236 [78], Le résidu insoluble est calculé en pourcentage par la formule suivante :

$$Résidu\ insoluble = \frac{(\text{Mcim}-\text{Mric})}{\text{Mi}} \text{ x100} \qquad \text{(II.6)}$$

Où :

Mcim : est la masse de la prise d'essai de ciment, en grammes ;

Mric: est la masse du résidu insoluble calcinée, en grammes ;

c) Détermination des chlorures

La présente méthode donne la teneur totale en halogénures, à l'exception du fluor ; le résultat est exprimé en Cl^- . L'échantillon de ciment est décomposé par l'acide nitrique dilué, bouillant. Les sulfures sont oxydés en sulfate et n'interférent pas. Les chlorures dissous sont précipités en ajoutant une quantité connue de solution étalon de nitrate d'argent. Après ébullition, le précipité est lavé à l'acide nitrique dilué et écarté. Le filtrat et les eaux de lavage sont refroidis en dessous de 25°C et le nitrate d'argent en excès est dosé par une solution étalon de thiocyanate d'ammonium en présence d'un sel de fer utilisé comme indicateur. Conformément à la norme NA5038 [79], la teneur en chlorure est calculée en pourcentage par la formule suivante :

$$\text{Cl}-= 0.1773 \text{ X } \frac{(\text{V2}-\text{V1})}{\text{m1}} \qquad \text{(II.7)}$$

Où :

V_1 : est le volume de la solution de thiocyanate d'ammonium requise pour la titration de la solution d'essai;

V_2: est le volume de la solution de thiocyanate d'ammonium requise pour la titration du blanc;

m_1: est la masse de la prise d'essai de ciment, en grammes ;

d) Détermination de la chaux libre

La chaux libre d'un échantillon est extraite au moyen d'acétoacétate d'éthyle à ébullition (méthode de Franke) ; l'extrait est titré à l'aide d'une solution étalon d'acide chlorhydrique 0,2 mol/l. Le pourcentage de la chaux libre est calculé par la formule suivante :

$$\% \text{ CaO libre} = \text{VxT} \qquad \text{(II.8)}$$

Avec :

V : volume du HCl en ml.

T : Titre.

II.7.2. Caractéristiques minéralogiques

a) Analyse par diffraction aux Rayon X

La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles …) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs.

Le Principe de la méthode est comme suit :

Les cristaux constituent des réseaux naturels dont les intervalles caractéristiques (intervalles entre plans réticulaires) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X. En conséquence, les rayons X sont diffractés par les cristaux comme la lumière par les réseaux et donnent des phénomènes d'interférences identiques. L'état cristallin est caractérisé par la répartition tripériodique dans l'espace d'un motif atomique. Cette répartition ordonnée constitue des plans parallèles et équidistants que l'on nomme plans réticulaires h, k, l.

Un faisceau de rayons X monochromatique et parallèle qui frappe un cristal est diffracté dans une direction donnée par chacune des familles des plans réticulaires à chaque fois que la condition ou loi de Bragg est réalisée :

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad n : \text{ordre de diffraction} \qquad \text{(II.9)}$$

Où :

λ : longueur d'onde du faisceau de rayons X

d : distance de deux plans réticulaires

θ : angle d'incidence des rayons X

Relation fondamentale, utilisée à la fois en diffractométrie et en spectrométrie.

L'intensité des réflexions d'une même famille de plans réticulaires varie avec la constitution de la maille élémentaire, c'est-à-dire avec le nombre, la disposition et la nature des atomes présents. Chaque espèce cristalline donne donc un diagramme de diffraction caractéristique, c'est-à-dire un ensemble de raies de diffraction.

La technique qu'on a utilisé est celle de Debye-Scherrer, dite méthode des poudres. Le matériau est bombardé par un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles de longueur d'onde connue (voir la figure suivante), produit grâce à une anticathode de cuivre. Le rayonnement émis est défini par un système de fentes (fentes Soller) et de

fenêtres situées avant et après l'échantillon. Ce dernier est étalé sous forme de poudre (15 mg) sur une lame de verre qui tourne d'un mouvement uniforme autour d'un axe situé dans son plan (cercle goniométrique), permettant ainsi d'augmenter le nombre d'orientations possibles des plans réticulaires. Les particules étant orientées au hasard, il y aura toujours une famille de plans donnants lieux à la diffraction, de telle sorte que l'on obtiendra simultanément tous les faisceaux susceptibles de diffracter : ces faisceaux forment des cônes de demi-angle au sommet 2θ.

Un détecteur ou compteur (Geiger-Müller ou compteur à scintillation) mesure l'intensité du rayonnement X diffracté dans certaines directions. Il tourne autour du même axe mais à une vitesse double de celle de l'échantillon. Pour un angle d'incidence θ, l'angle mesuré par le déplacement du compteur sera donc 2θ. Un diaphragme à couteau permet d'éliminer l'effet parasite du faisceau incident dans les petits angles (2θ < 10°). L'enregistrement réalisé est la couche de l'intensité des rayons X diffractés en fonction des angles de diffraction (Fig. II.18).

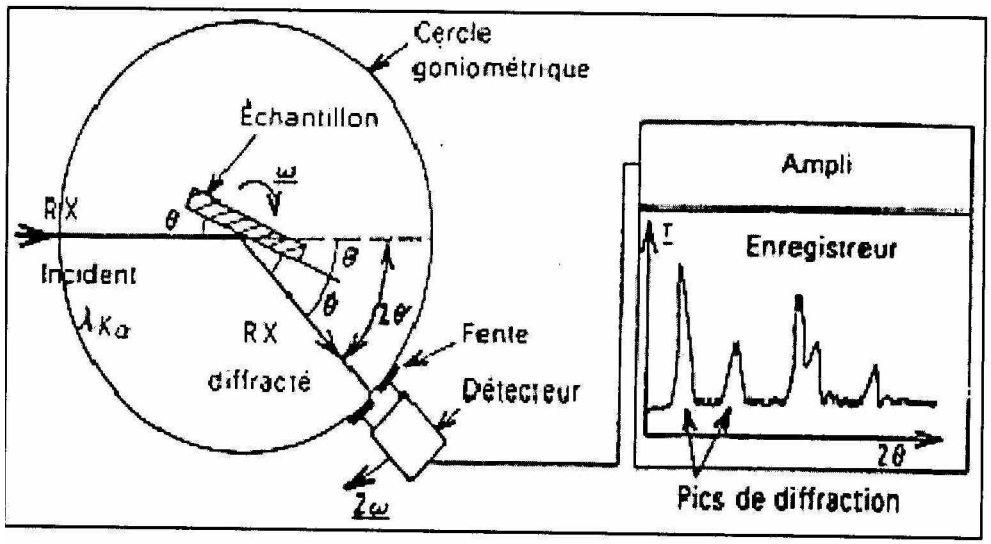


Fig. II.18: Schéma d'un diffractomètre à compteur.

L'acquisition est effectuée par une unité de contrôle et le traitement des diffractogrammes ou spectres s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les données des fiches ASTM (American Society for Testing and Materials), faisant correspondre les distances interréticulaires d aux angles 2θ enregistrés. La position des pics de diffraction permet l'identification des structures ou phases cristallines présentes et donc la détermination de la composition cristallographique de l'échantillon analysé. La position des pics peut

également servir à identifier des transformations ordre-désordre tandis que la forme du pic peut permettre d'identifier des micro-déformations.

Cette méthode permet l'identification de l'espèce cristalline étudiée, voire l'analyse qualitative des espèces cristallines présentes dans les matériaux si celui-ci est multiple.
Les analyses ont été faites au laboratoire de physique de l'université de Laghouat. L'appareil utilisé est un Diffractomètre à rayon X (Fig. II.19) couplé à un système informatique permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis. Les tests ont été effectués sur les 15 échantillons des ciments. Le but essentiel de cette analyse par diffraction des rayons X est l'identification des différentes phases cristallines présentes dans un échantillon de ciment. Un grand nombre d'essai est effectué et chaque manipulation est répétée plusieurs fois avec un nombre minimal de 6.

b) Microscope Electronique A Balayage

Le microscope électronique à balayage permet une analyse chimique élémentaire et ponctuelle de la matière qu'elle soit cristallisée ou amorphe (contrairement à la diffraction des rayons X qui ne permet que l'étude des phases cristallisées). Il permet aussi de déterminer la répartition des oxydes à travers la matière à l'échelle de micron ou les microcristaux à l'échelle d'angström, ainsi que la proportion des oxydes. Le faisceau d'électrons incidents, focalisé par des lentilles électromagnétiques, constitué d'une source dont le diamètre est de l'ordre de (50 à 100 Ã) lui donne une résolution bien supérieure. Les échantillons massifs peuvent être examinés avec une très grande profondeur de champ donnant l'impression d'une vision tridimensionnelle. Chaque type d'interaction électron –matière fournit un signal propre qui apporte des informations sur l'objet examiné. A chaque type de signal peut correspondre un mode de fonctionnement du MEB avec formation d'une image. Le signal choisi, détecté puis amplifié, sert à moduler l'intensité du faisceau d'un oscilloscope ou d'un tube de télévision dont le balayage est synchrone de celui de l'échantillon massif, les images les plus informatives de la microstructure du matériau sont données par des électrons secondaires [80].
Le quantitative des constituants du clinker ainsi que le type et le pourcentage d'ajouts a été déterminé par Microscope optique pour analyse minéralogique des ciments par un d'appareil de type: Microscope optique : AXIOSCOPE 40, Marque : ZEISS. Ces essais ont été réalisés au CETIM Boumerdès.



Fig II.19: Vue d'ensemble du diffractomètre à rayons X.

II.8 Composition et confection des éprouvettes

L'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées, et en particulier la résistance et l'ouvrabilité. Cette composition a été choisie pour refléter les pratiques courantes sur les chantiers algériens.

Dans notre étude, on a utilisé la méthode de Dreux-Gorisse [1]. La composition a été déterminée pour un diamètre maximal des granulats de 15 mm, un affaissement au cône d'Abrams de 60 à 90 mm et une résistance caractéristique de béton à 28 jours de 30 MPa. Le dosage en ciment a été fixé à 350 kg/m^3, et le rapport Eau sur Ciment (E/C) à 0.63. Les proportions des granulats sont résumées sur la Figure II.20.

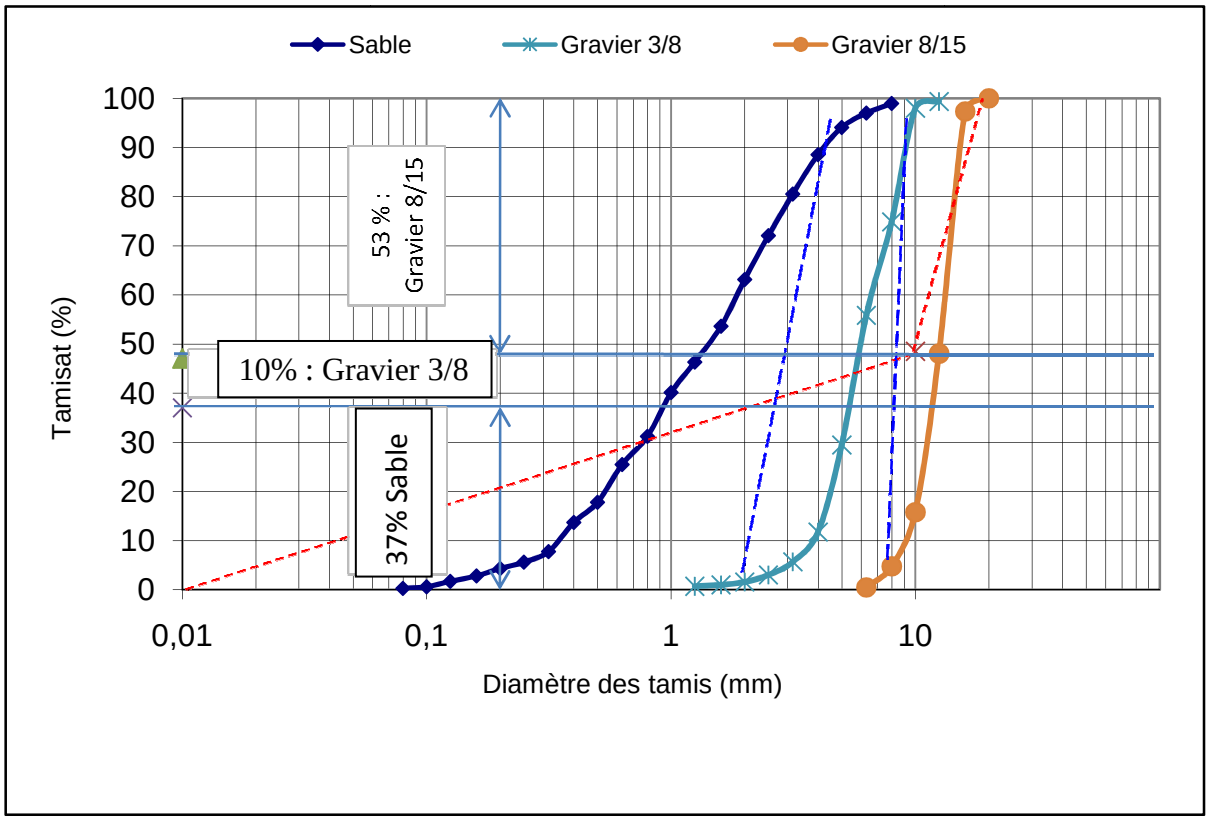


Fig. II.20 : Proportions des granulats utilisés.

Après avoir pesé les quantités de matériaux utilisés (gravier, sable, ciment et eau), tous les mélanges ont été gâchés dans un malaxeur à béton à axe vertical d'une capacité de 56 litres (Fig. II.21). Ces matériaux ont été mélangés dans un premier temps à sec pendant 30 secondes. L'eau a été ensuite introduite pendant une minute pour obtenir une matière homogène et ouvrable.



Fig. II.21 : Malaxage du béton.

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes en bétons sont de forme cubique (150 x 150 x 150) mm^3 pour l'essai de la résistance à la compression, et de forme prismatique (70 x 70 x 28) mm^3 pour l'essai de résistance à la flexion. Concernant l'essai d'absorption capillaire, les parties résultantes de l'essai à la flexion ont été utilisées.

Après la préparation des bétons, les moules ont été remplis avec les mélanges et compactés (voir fig. II.22) selon la norme NF P 18-404 [81] et NF P 18- 405 [82]. Les moules contenant des bétons ont été couverts par un film plastique et stockés dans les dans les conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été ont été démoulés et conditionnés dans des bacs remplis d'eau à une température de 20 °C±2°C, jusqu'à la date d'essais.



Fig. II.22 : Moules utilisés.

II.9 Essais sur béton

II.9.1 Ouvrabilité

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump-Test) permet de mesurer l'ouvrabilité des bétons (Fig. II.23). L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-451 [72]. On remplit le béton dans le moule tronconique (h=300 mm D=200 mm et d=100 mm). Le remplissage à été exécuté en trois couches tassées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Fig. II. 23: Cône d'Abrams.

II.9.2 Résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique sur des éprouvettes cubiques (150 x 150 x 150) mm^3, ces dernières ont été centrées entre les deux plateaux sur les faces latérales de moulage, après la mise en marche de l'appareil, la charge augmente automatiquement à une vitesse constante permettant aux plateaux de comprimer l'éprouvette jusqu'à la rupture (Fig. II.24). L'essai a été réalisé conformément à la norme NF P 18 – 406 [83].



Fig. II.24 : Dispositif de l'appareil de compression.

II.9.3 Résistance à la flexion

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on a utilisé le dispositif de flexion à quatre points (Fig. II.25). Le calcul de la formule de la contrainte de flexion s'établie comme suit :

$$\sigma_f = \frac{M}{I}.v \text{ (MPa)} \qquad \text{(II.10)}$$

Avec :

$I = \frac{b.h^3}{12}$ (II.11), $v = \frac{h}{2}$ (II.12) et $\sigma_f = 3.\frac{PL1}{b^3}$ (MPa) (II.13)

P : la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, M : le moment de rupture = $PL_1/2$.
Contenue des dimensions b=h et L= $2L_1+L_2$= 200 mm, L_1 = 75 mm. Si P est exprimée en newton (N), la résistance à la flexion exprimée en MPa vaut :

$$\sigma_f = 0.656x\ 10^{-3}\ P \qquad \text{(II.14)}$$



Fig. II.25 : Dispositif de l'appareil de flexion.

II.9.4 Essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité)

Les spécimens de béton sur lesquels on a effectué les essais de l'absorption d'eau sont de forme cubique de 70 mm de côté. Ils sont séchés dans une étuve jusqu'à atteindre la masse constante. Les faces latérales des spécimens ont été couvertes d'une mince couche de silicone pour assurer l'écoulement unidimensionnel, ensuite ils sont positionnés dans un récipient contenant de l'eau. Le niveau de l'eau dans ce récipient est environ de 5 mm au dessus de la base des spécimens. La figure II.27 montre un schéma de l'essai d'absorption d'eau.

Les masses des spécimens ont été mesurées tous les : ¼ h, ½ h, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h, 48 h et 72 heures, à l'aide d'une balance de précision de 0.01 g. Le coefficient de sorptivité (S) a été obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{Q}{A}=S \cdot \sqrt{t} \qquad \text{(II.15)}$$

Q : la quantité d'eau absorbé en (cm^3)

A : la surface du spécimen en contact avec l'eau (cm^2)

T : le temps en (s)

S : le coefficient de sorptivité du spécimen ($cm/s^{1/2}$)

Pour déterminer le coefficient de sorptivité, Q/A a été tracé en fonction de la racine carrée du temps $\sqrt{t}$ puis, S a été calculé à partir de la pente de la relation linéaire entre Q/A et $\sqrt{t}$ (Fig. II.28).

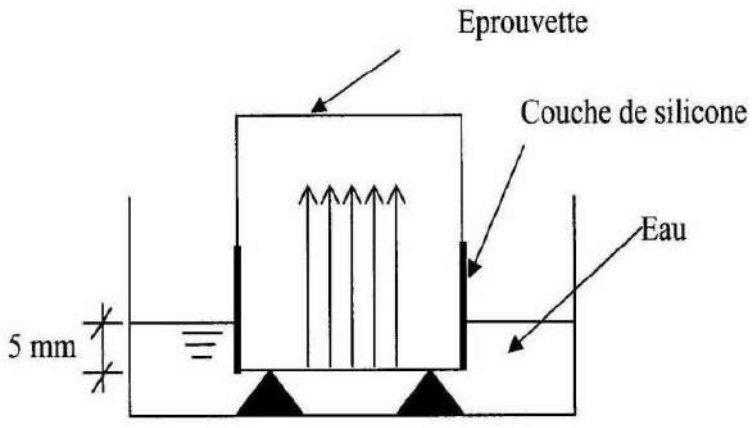


Fig. II.26 : Schéma de l'essai d'absorption d'eau.

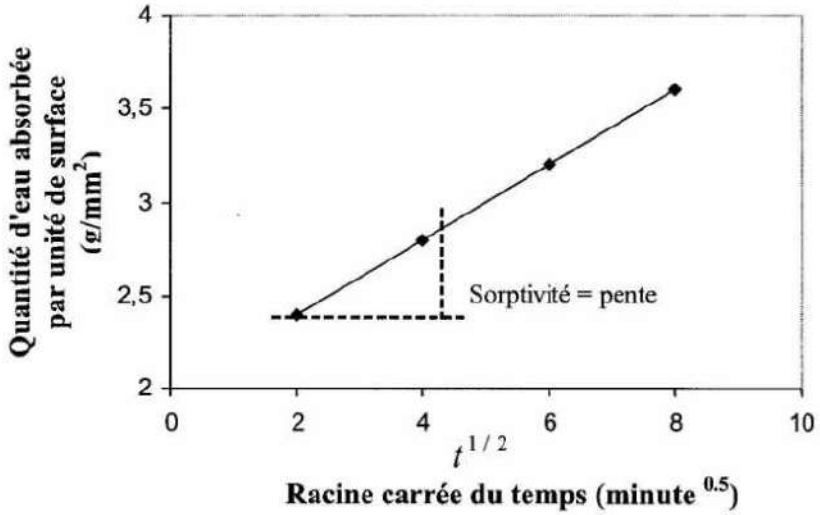


Fig. II.27 : Détermination de la sorptivité.

II.10 Variable étudiées

La figure II.28 résume les variables étudiées dans cette partie expérimentale. La réalisation de cette étude a nécessité la confection de 225 éprouvettes pour les essais mécaniques sur mortiers, 45 éprouvettes pour la mesure du retrait sur mortier, 45 éprouvettes pour l'absorption sur mortier, 60 éprouvettes pour les la mesure de l'expansion en sulfate et la perte en masse. 45 éprouvettes cubiques pour les essais de résistance de béton et 45 prismatiques pour les essais d'absorption sur béton.

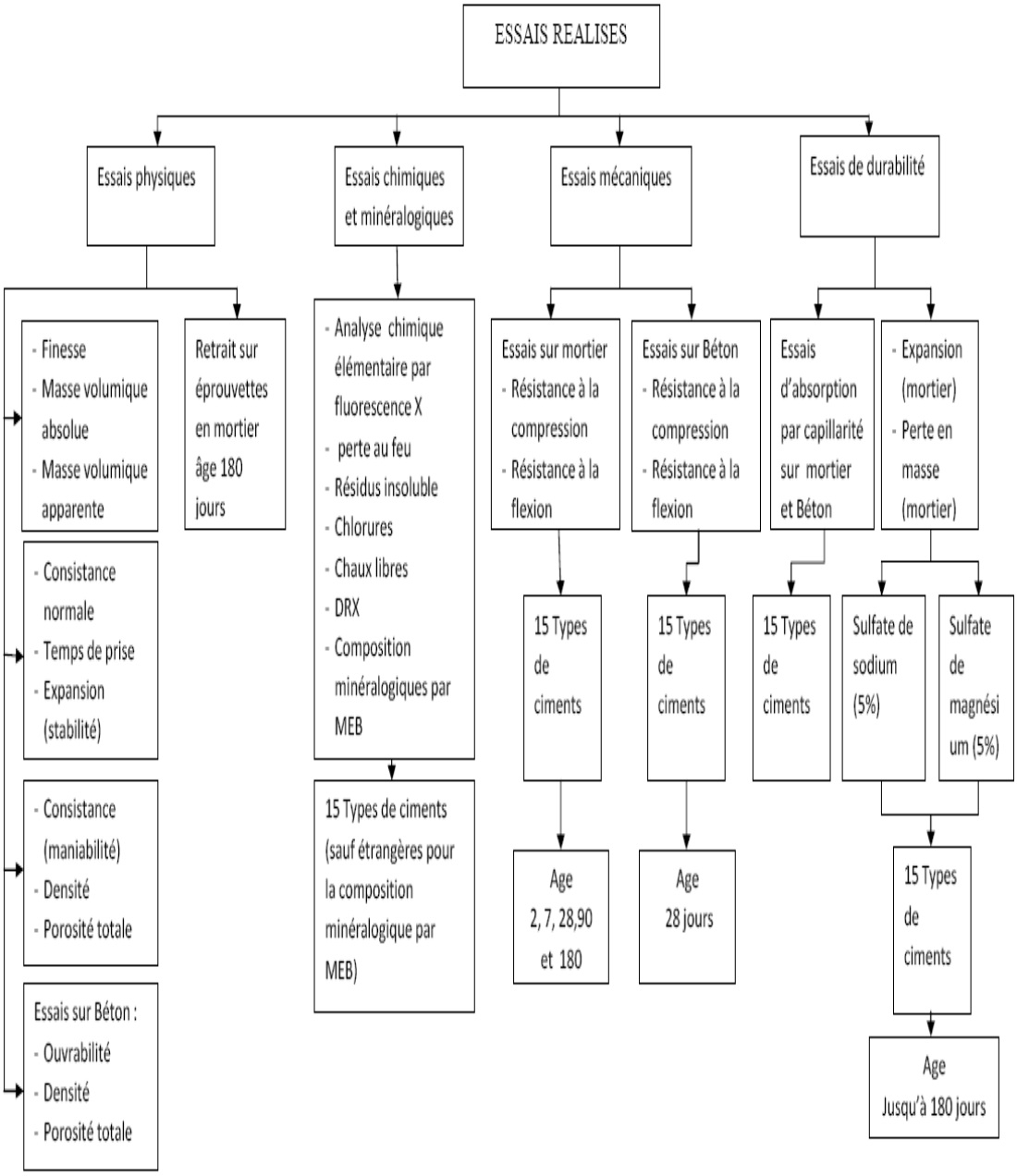


Fig. II.28 : Variable étudiées pour les essais réalisés dans l'étude expérimentale.

Chapitre III

Analyse et interprétation des résultats expérimentaux

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des essais expérimentaux, réalisés sur ciment, mortier à base de ciment et béton sont présentés. Une analyse sommaire et des tentatives d'interprétation et d'explication de ces résultats sont données.

III.2 Essais chimiques et minéralogiques

III.2.1 Essais chimiques

Les essais chimiques qui ont été faites au niveau de laboratoire CETIM sur les 15 ciments font ressortir les résultats cités dans le tableau III.1. Les compositions chimiques des déférents ciments composés dépendent des caractéristiques des matières premières à prendre en compte au niveau du mélange des matières crues (calcaire et argile) ainsi que les caractéristiques des ajouts cimentaires et leurs pourcentages de substitution.

On remarque que tous les ciments testés présentent une composition chimique conforme aux limites exigées par les normes. Cependant, une très grande variation est observée entre les différents ciments en raison de la variation dans la matière première, les ajouts utilisés et les variations liées aux différentes phases de fabrication. Le pourcentage le plus élevé de la composante chimique de SiO_2 est observé sur le CEM II/A 42.5 importé de la Turquie, cela est dû principalement au type de l'ajout utilisé. Deux valeurs importantes de 26.55% et 26.43% de SiO_2 sont remarqués respectivement sur le CEM II/A 42.5 de Béni Saf et le CEM II/A 42.5 de Hama Bouziane qui sont produit avec l'ajout tuf d'origine pouzzolanique. Pour les autres composantes chimiques, il a été enregistré une valeur élevée de 7% d'Al_2O_3 pour le CEM II/A 42.5 importé de la Turquie et 6,34% pour le CEM II/A 42.5 de Hama Bouziane.

Le maximum de CaO est donné par le CEM II/A 32.5 de Rais Hamidou d'ajout Calcaire (poussière). La teneur en insolubles correspond à la proportion de ciment qui n'est pas soluble dans l'acide chlorhydrique. Il s'agit habituellement de Silice (SiO_2) qui n'a pas réagi dans le four avec d'autres composants du ciment. La teneur en insolubles est un indice de l'accomplissement des réactions chimiques normales dans le four rotatif au cours de la fabrication du ciment portland [84]. La grande valeur se trouve dans le CEMII/A 42.5 importé de la Tunisie qui nécessite une vérification de l'ajout calcaire mentionné sur le sac de ciment concerné.

La perte au feu qui s'effectue en chauffant à une température élevé de 1000 °C la masse de ciment, la diminution de cette masse après le chauffage exprimée en pourcentage de la masse initiale ne devrait dépasser 3%. La perte au feu dépend principalement de l'éventement (ou préhydratation) du ciment causé par entreposage inadéquat, une perte au feu élevée de 10.37% est enregistrée pour le CEM II/B 42.5 de M'sila.

III.2.2 Essais minéralogiques (analyse microscopique)

Les essais minéralogiques qui ont été faites au niveau de même laboratoire CETIM sur les 13 ciments algériens fait ressortir les résultats cités dans le tableau III.2. Les compositions minéralogiques des ciments composés dépendent plus des caractéristiques des matières premières à prendre en compte au niveau du mélange des matières crues (calcaire et argile) de la phase clinker. Le CEM II/B 42.5 de Mascara contient le plus grand taux de 59% de C_3S, le CEM II/B 42.5 de Msila contient le plus grand taux de 25% de C_2S. Par contre, le CEM II/A 42.5 Hama Bouziane et le CEM II/32.5 de Rais Hamidou comporte le plus grand taux de 12% de C_3A. Une valeur de 2% de CaO libre est enregistrée pour le CEM II/A 32.5 de Rais Hamidou et le CEM II/A 42.5 de Meftah. La norme EN 197-1 [21] stipule que la teneur en pourcentage de l'ajout pour les CEM II/B est située entre 21 et 35% où l'analyse minéralogique indique une teneur de 17% de l'ajout calcaire constaté sur le CEM II/B 42.5 de Mascara. Il est très possible qu'un autre ajout comme la pouzzolane a aussi utilisé en un taux de 5 à 8%. Pour le reste des types de ciment utilisés, leurs pourcentages de substitution de ciment par les ajouts sont conformes à cette norme c'est-à-dire entre 6 à 20 %.

III.2.3 Essais minéralogiques (DRX)

Les essais minéralogiques DRX qui ont été réalisés à l'Université de Laghouat mettent en évidence l'existence des éléments de la composition minéralogique (Fig. III.1). Néanmoins, cette analyse a un aspect qualitatif et non quantitatif. Cette analyse confirme l'existence des C_3S, C_2S, C_3A et C_4AF ainsi que la validation des résultats obtenus dans le Tableau III.2 concernant la nature de l'ajout minéral introduit dans la fabrication des différents ciments utilisés.

Tableau III.1 : Composition chimiques des ciments utilisés.

Ciment / Teneurs (%)	Hadjar El Soud	Hamma Bouziane	Ain El Kebira	Ain El Touta	Tebessa	Béni Saf	Saida	Chlef	Rais Hamidou	Meftah	Sor El Ghozlane	M'sila	Maascar	Turquie	Tunisie	limites éxigées
SiO_2	23,32	26,43	24,08	18,89	23,26	26,55	17,58	21,89	21,11	21,8	19,26	17,18	23,83	30,11	21,9	18 à 24
	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	± 0,14	
Al_2O_3	6,19	6,34	5,43	4,68	5,46	6,26	4,84	6,15	4,96	4,41	4	4,28	6,05	7	4,87	4 à 8
	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	
Fe_2O_3	3,29	2,33	4,88	3,28	3,24	2,15	2,6	3,95	2,37	2,82	3,34	2,97	4,66	3,22	3,47	1 à 8
	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	
CaO	60,68	58,61	56,15	61,41	59,63	58,93	62,37	58,76	63,47	61,51	63,3	59,97	56,35	50,13	61,57	60 à 69
	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	± 0,21	
MgO	1,45	1,78	2,19	1,65	1,55	1,71	1,02	1,13	1,01	0,85	2,29	1,88	2,44	1,48	2,09	0 à 5
	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	
K_2O	0,69	0,89	0,37	0,68	0,69	0,91	1,02	0,67	0,86	0,65	0,58	0,58	0,83	0,85	0,51	0 à 2
	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	
Na_2O	0,3	0,42	0,37	0,25	0,39	0,49	0,09	0,57	0,59	0,14	0,18	0,15	0,58	0,63	0,18	
	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	
SO_3	2,17	1,55	1,68	2,11	2,63	1,51	1,91	1,62	1,95	1,55	1,59	2,3	2,37	3,3	2,3	0 à 3
	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	
CaO libre	0,869	0,825	0,329	0,851	0,755	0,784	0,846	0,458	1,317	1,423	0,721	0,483	0,765	0,532	0,935	0 à 2
	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	± 0,009	
Cl^-	0,00426	0,01064	0,00851	0,0195	0,01028	0,01277	0,00426	0,00709	0,01986	0,00496	0,00957	0,03581	0,03511	0,00745	0,00957	/
	± 0,00001	± 0,00002	± 0,00002	± 0,00004	± 0,00002	± 0,00003	± 0,00001	± 0,00001	± 0,00004	± 0,00022	± 0,00002	± 0,00007	± 0,00007	± 0,00001	± 0,00002	
R. Insol	0,66	9,58	6,22	1,98	0,51	8,33	3,12	5,19	1,34	4,3	0,74	3,82	6,51	2,19	14,35	/
	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,15	
P.F	1,56	1,21	4,36	6,72	2,76	1,1	8,25	4,67	3,39	5,9	5,13	10,37	2,23	2,2	2,81	/
	± 0,004	± 0,003	± 0,012	± 0,018	± 0,007	± 0,003	± 0,022	± 0,012	± 0,009	± 0,016	± 0,014	± 0,028	± 0,006	± 0,006	± 0,007	

Tableau III.2 : Composition minéralogique des ciments utilisés.

Ci-ment / Teneur %	Hadjar El Soud	Hamma Bouziane	Ain El Kebira	Ain El Touta	Tebessa	Béni Saf	Saida	Chlef	Rais Hamidou	Meftah	Sor El Ghozlane	M'sila	Maascar	Limites exigées
C3S	54	55	57	56	56	56	58	57	54	57	54	53	59	50 à 70
C2S	22	21	19	21	19	18	17	18	20	18	23	25	16	5 à 25
C3A	11	12	4	5	8	11	11	11	12	7	5	5	7	2 à 12
C4AF	7	6	14	12	10	8	8	8	7	11	13	12	12	0 à 5
CaO libre	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	0 à 2
Régulateur de prise Gypse	5	5	5	5	6	6	5	5	5	5	4	4	5	0 à 5
Phase ajout	10 Laitier (S)	10 Tuf (Z)	10 Laitier (S) + 10 Calcaire (L)	13 Calcaire (L)	10 Laitier (S)	10 Tuf (Z)	17 Calcaire (L)	12 Calcaire (L)	7 Calcaire (L)	10 Calcaire (L) + 5 Tuf (Z)	10 Calcaire (L)	18 Calcaire (L) + 3 Pozzolane (Z)	17 Calcaire (L)	CEMII/A: 0 à 20 CEMII/B: 21 à 35

Ain Kebira : presence de grain de Pozzolane, Tebessa : Presence de grains de Calcaire, Rais Hamidou : Presence de grains de Tuf,

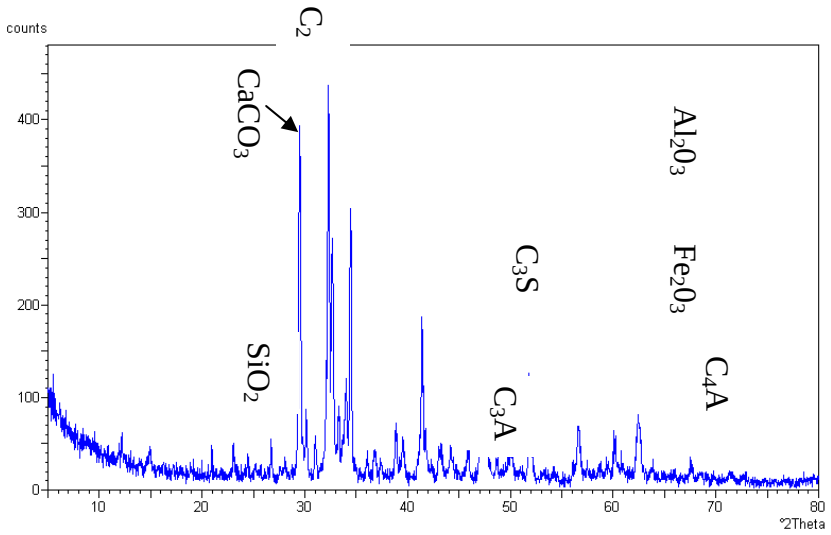


Fig. III.1.a : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Meftah.

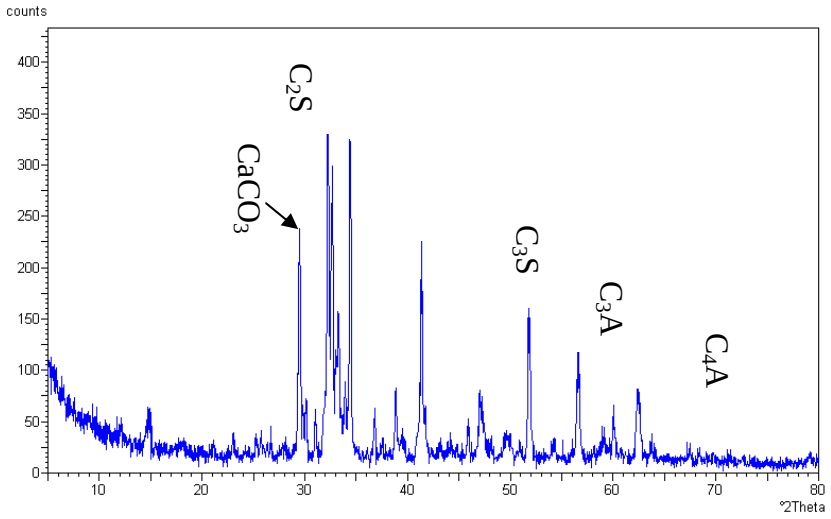


Fig. III.1.b : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 32.5 Rais Hamidou.

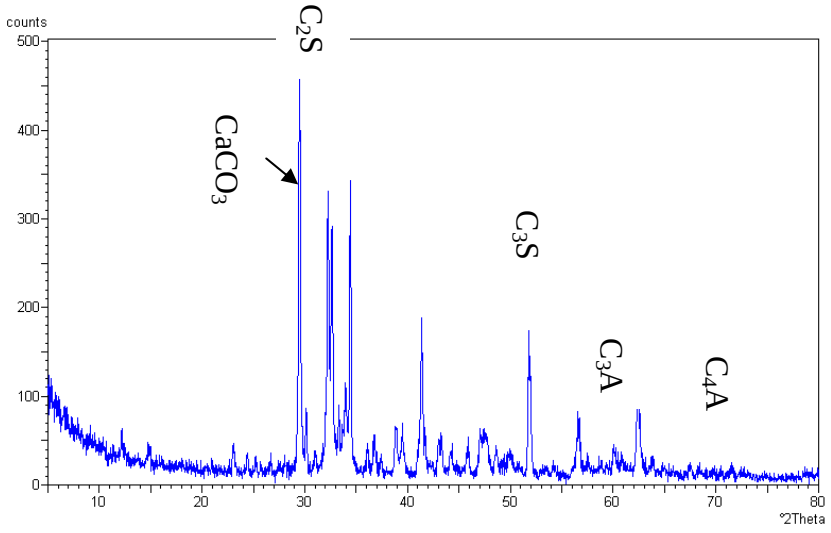


Fig. III.1.c : Diagramme de DRX appliqué le CEM II/A 42.5 Sour El Ghozlane.

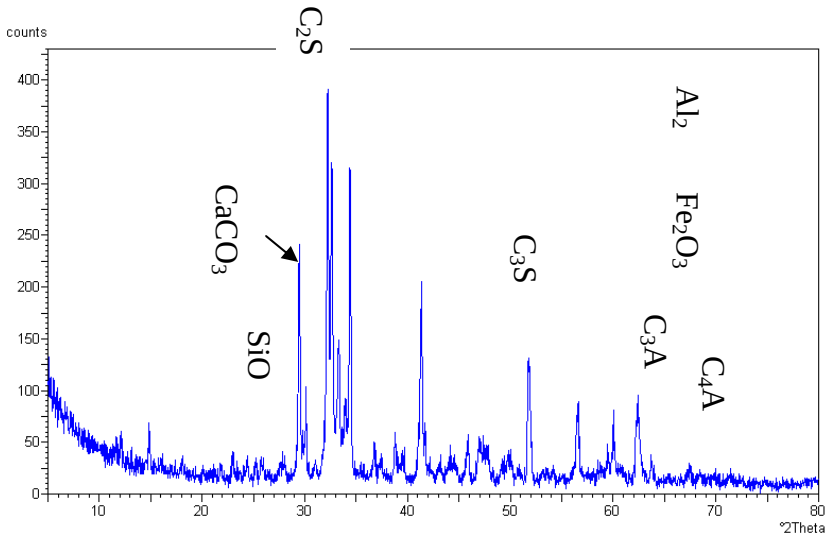


Fig. III.1.d : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Béni Saf.

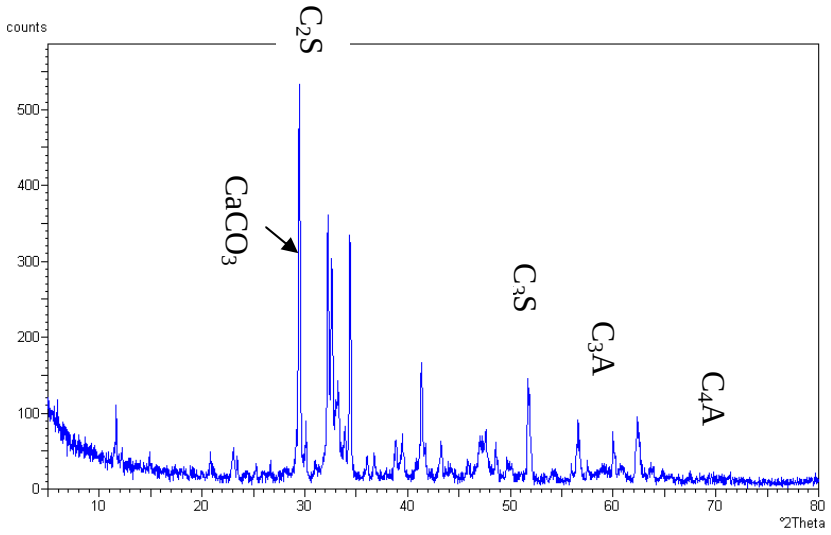


Fig. III.1.e : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Saida.

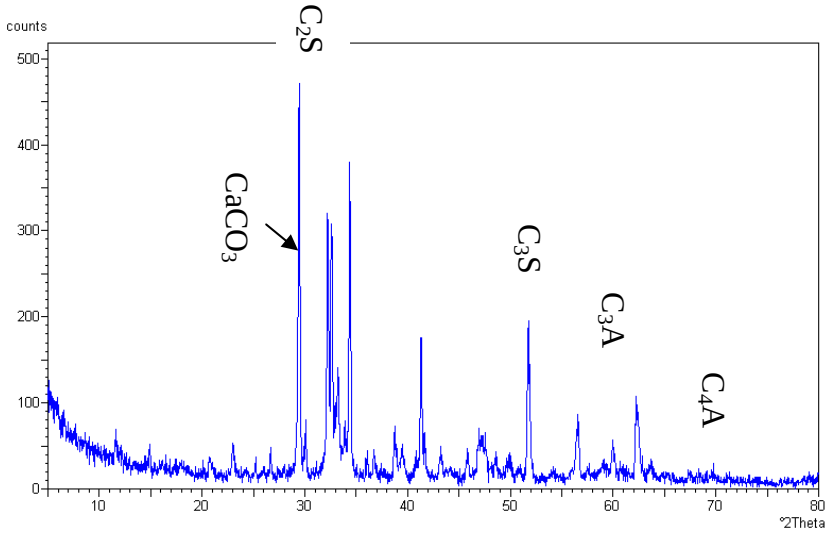


Fig. III.1.f : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Chlef.

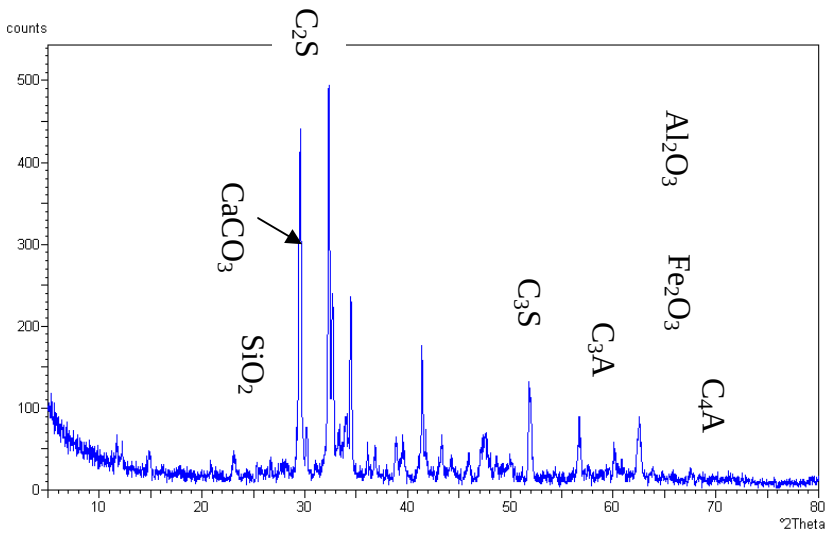


Fig. III.1.g : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Ain El Touta.

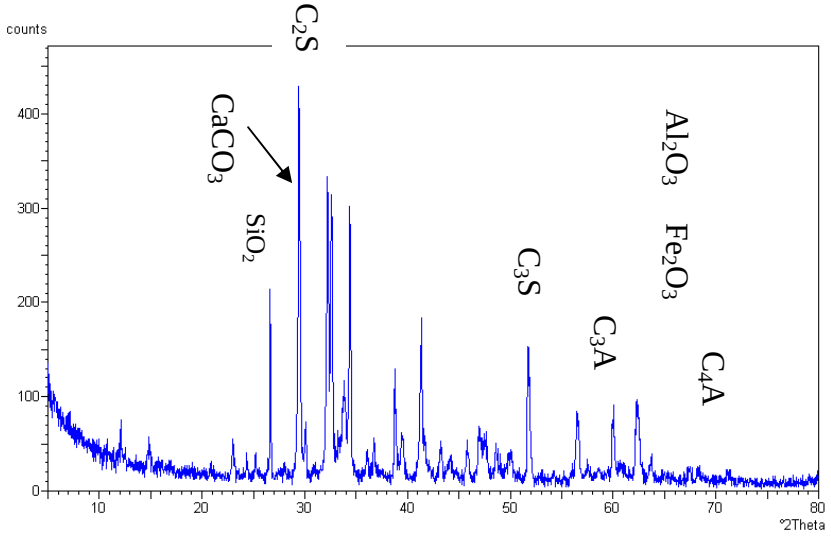


Fig. III.1.h : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Ain El Kebira.

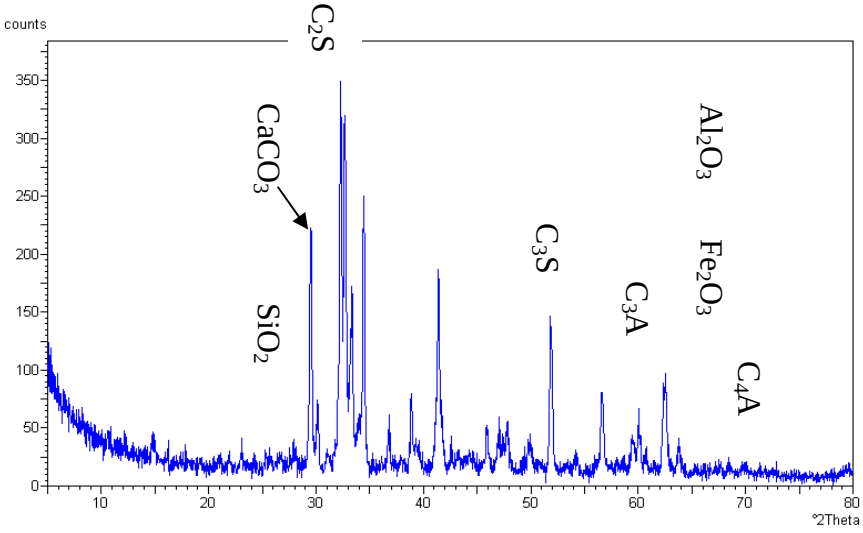


Fig. III.1.i : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Hama Bouziane.

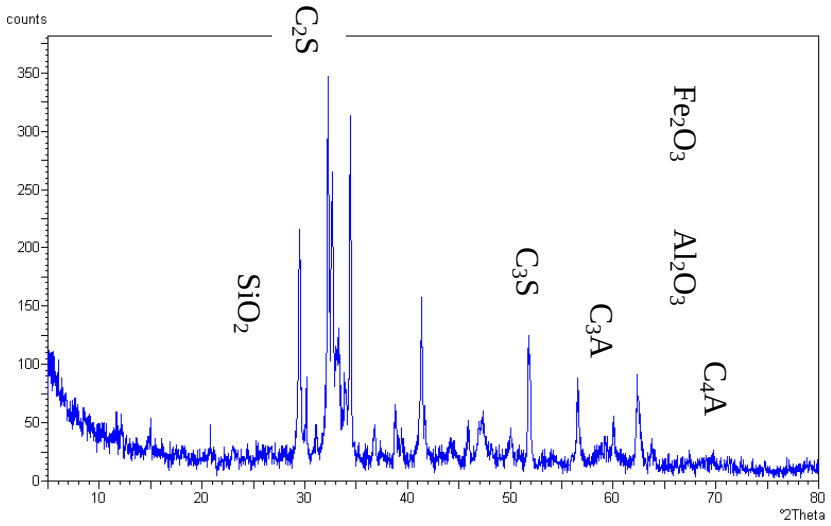


Fig. III.1.j : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Hadjar El Soud.

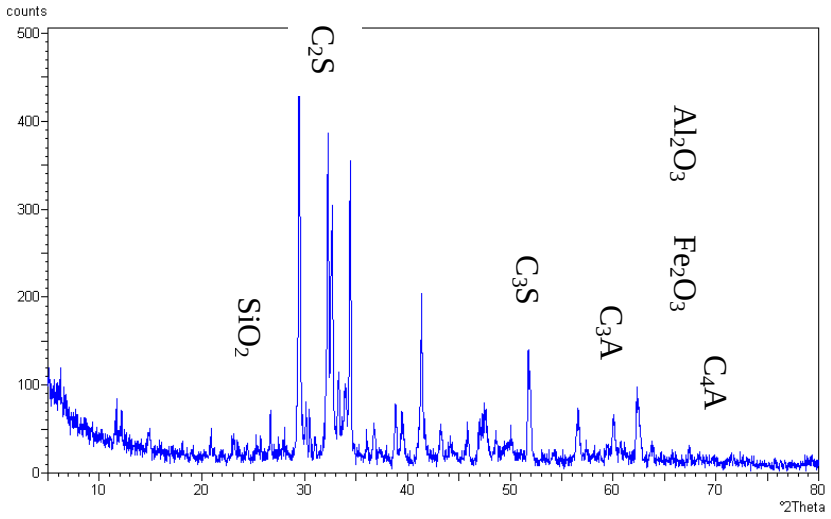


Fig. III.1.k : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Tebessa.

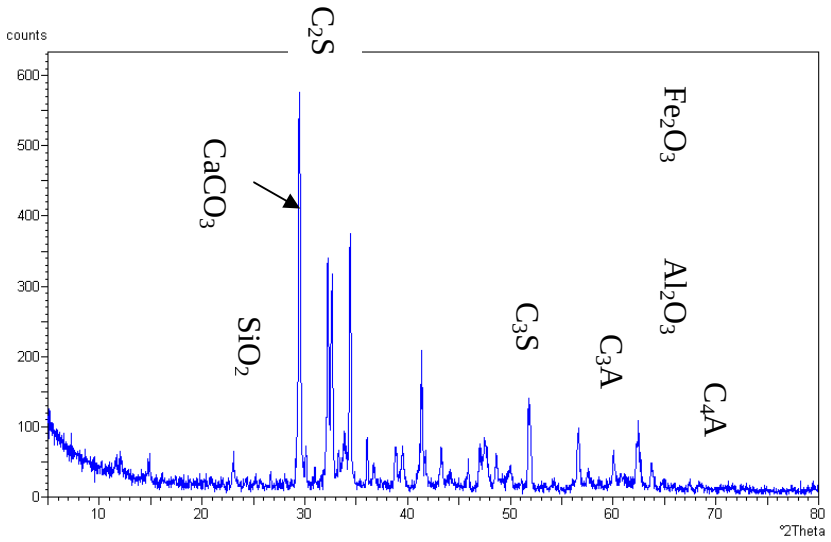


Fig. III.1.l : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 M'sila.

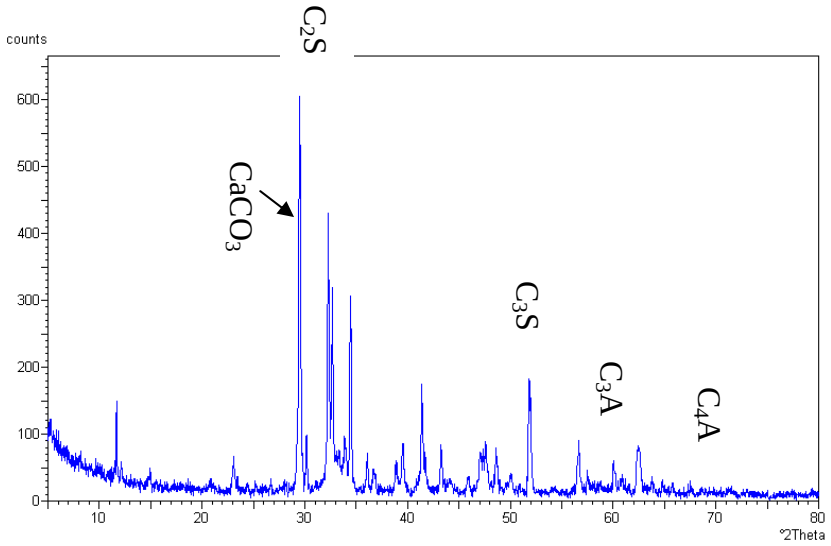


Fig. III.1.m : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 Maascar.

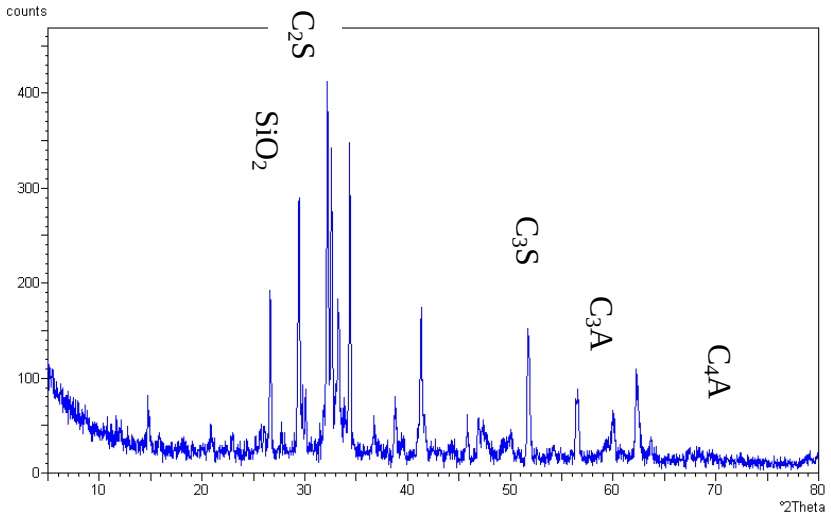


Fig. III.1.n : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Turquie.

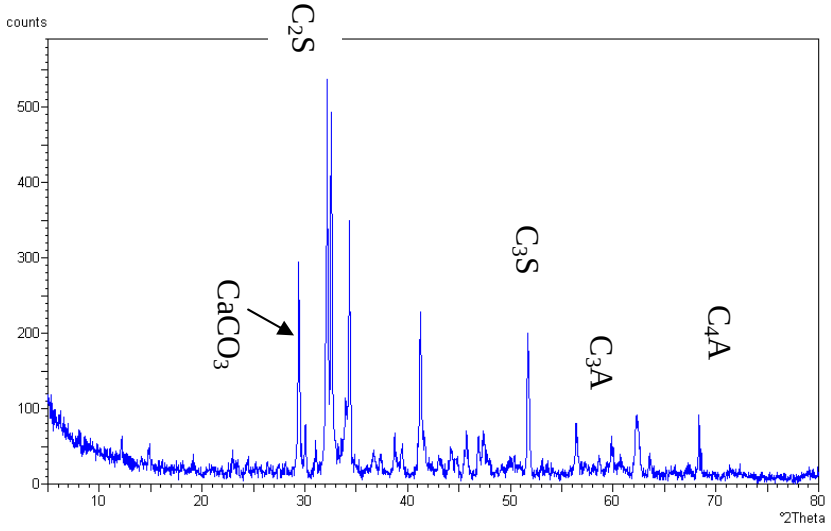


Fig. III.1.o: Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Tunisie.

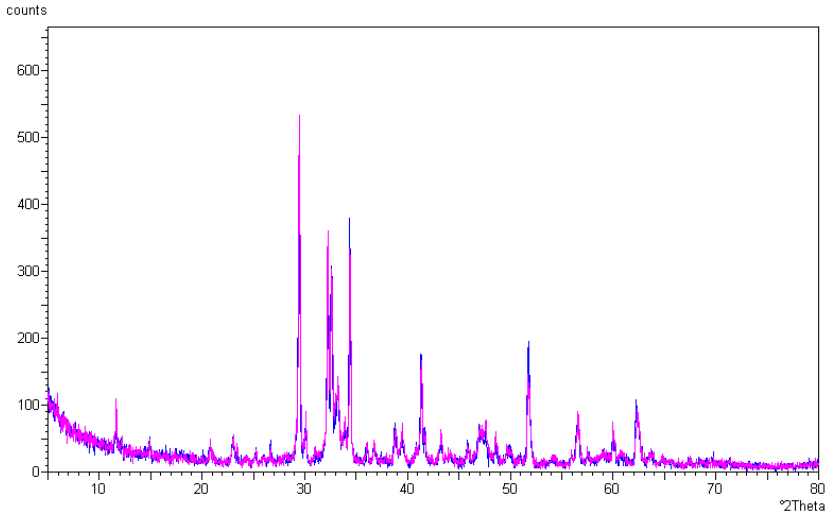


Fig. III.1.p : Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 Chlef et le CEM II/A 42.5 Saida (diagrammes superposés).

III.3. Caractéristiques physiques

III.3.1 Finesse

Les résultats obtenus lors de la réalisation des essais de finesse au niveau de laboratoire de l'Université de Blida sont les suivants (Fig. III.2). On remarque que tous les ciments présentent une finesse supérieure à 3000 cm^2/g. les ciments de Ain Touta, Maascar et celui importé de la Turque ont une finesse très élevée d'environ 5000 cm^2/g.

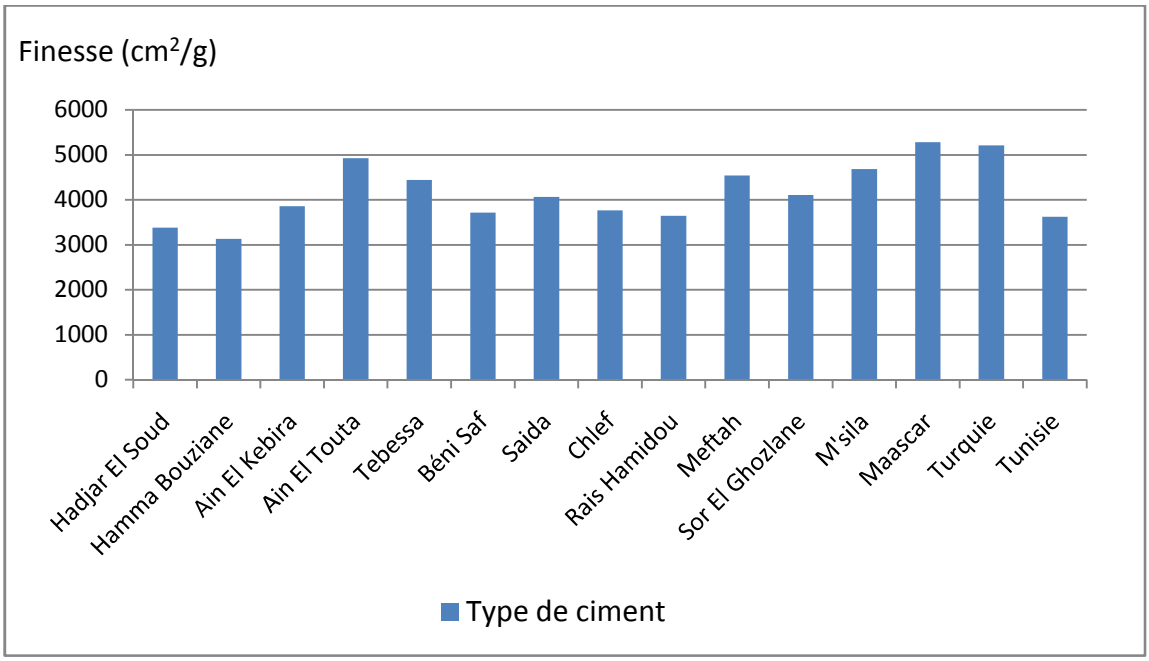


Fig. III.2 : Finesse des types de ciments utilisés.

III.3.2 Masse volumique

a) Masse volumique absolue

Les essais réalisés au laboratoire de chimie de l'Université de Médéa ont permis d'obtenir les masses volumiques données par la figure III.3. Elle mettre en évidence ces résultats des différentes masses spécifiques en fonction du ciment.

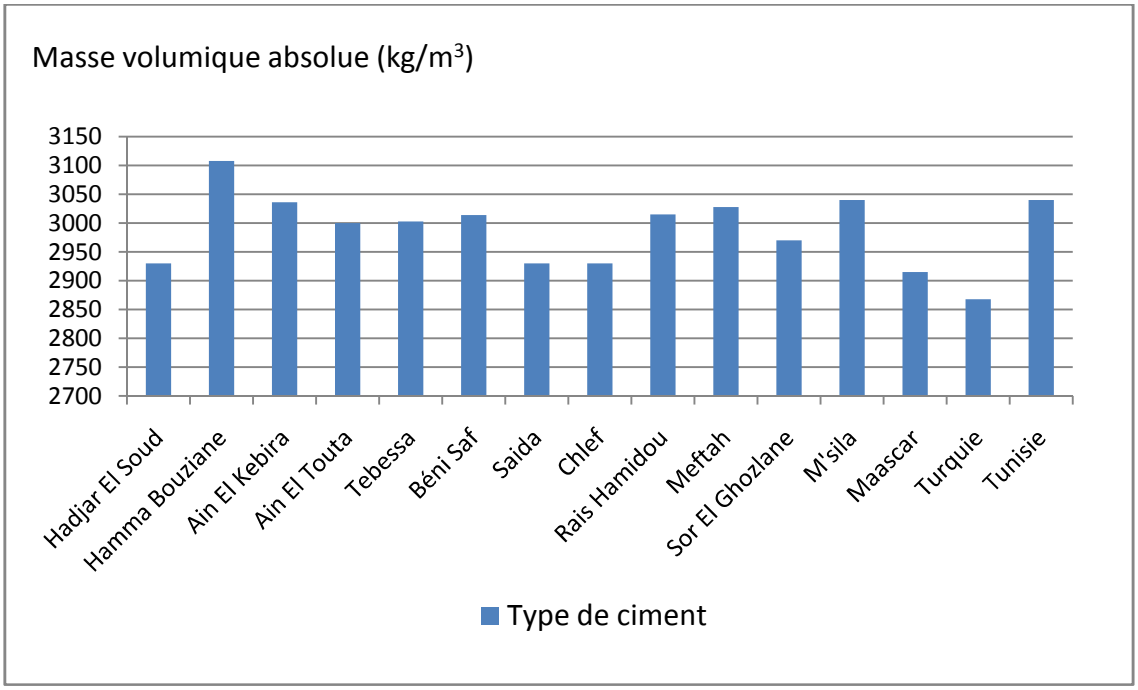


Fig. III.3 : Masse volumique absolue des différents ciments utilisés.

On remarque une différence significative entre les poids spécifiques des ciments étudiés. Ceci est dû à la nature de l'ajout minéral incorporé dans le ciment composé, leur teneur de substitution, la finesse de mouture, la teneur en CaO libre, la teneur de régulateur de prise (gypse) et le clinker.

Le poids spécifique diminue en fonction de l'augmentation de la finesse. Sous le choc des boulets, la cohésion moléculaire du cristal est en partie détruite (certains atomes se trouvent séparés les uns des autres). Il se développe localement, à la surface des grains fraichement rompus, de puissantes forces d'attraction (dans le cas du clinker, on trouve des atomes électropositifs et électronégatifs) [33]. Il se produit enfin une soudure à froid provenant de la modification de la structure de la matière lors du broyage.

Il faut noter que les ajouts utilisés dans les différents ciments ont des masses volumiques différentes.

L'effet du type d'ajout sur la masse volumique est proportionnel à son taux d'addition. Le CEMII/A 42.5 importé de la Turquie présente le poids spécifique (2868 kg/m^3) le plus faible en raison de finesse de Blaine très élevée (5208 cm^2/g) et à la nature de l'ajout utilisé (quartz). On observe aussi que le ciment CEMII/B 42.5 de Mascara présente une masse volumique assez faible de 2915 kg/m^3 en raison de sa finesse élevée (5297 cm^2/g) et la teneur élevée de l'ajout calcaire de 17%.

Tableau III.3: Masse volumique absolue, finesse, teneur et nature de l'ajout minéral et la teneur du gypse des différents ciments utilisés.

Type de ciment	Masse volumique absolue (g/cm^3)	Finesse (cm^2/g)	Ajout minéral (teneur et nature)	Teneur du gypse
CEM II/A 42.5 Hadjar El Soud	**2,930**	**3379**	10% laitier (S)	**5%**
CEM II/A 42.5 Hama Bouziane	**3,108**	**3135**	10% tuf (Z)	**5%**
CEM II/A 42.5 Ain El Kebira	**3,036**	**3861**	10% laitier (S) + 10% calcaire (L)	**5%**
CEM II/A 42.5 Ain El Touta	**3,000**	**4928**	13% calcaire (L)	**5%**
CEM II/A 42.5 Tebessa	**3,003**	**4441**	10% laitier (S)	**6%**
CEM II/A 42.5 Béni Saf	**3,014**	**3716**	10% tuf (Z)	**6%**
CEM II/A 42.5 Saida	**2,930**	**4067**	17% calcaire (L)	**5%**
CEM II/A 42.5 Chlef	**2,930**	**3766**	12% calcaire (L)	**5%**
CEM II/A 32.5 Rais Hamidou	**3,015**	**3646**	7% calcaire (L)	**5%**
CEM II/A 42.5 Meftah	**3,028**	**4543**	10% calcaire (L) + 5% tuf (Z)	**5%**
CEM II/A 42.5 Sour El Ghozlane	**2,970**	**4107**	10% calcaire (L)	**4%**
CEM II/B 42.5 M'sila	**3,040**	**4683**	18% calcaire (L) + 3% pouzzolane (Z)	**4%**
CEM II/B 42.5 Maascar	**2,915**	**5279**	17% calcaire (L)	**5%**
CEM II/A 42.5 Turquie	**2,868**	**5208**	quartz	
CEM II/A 42.5 Tunisie	**3,040**	**3620**	Calcaire (L)	

b) masse volumique apparente

Les essais réalisés au laboratoire de l'université de Médéa ont permis d'obtenir les résultats suivants (Fig. III.4).

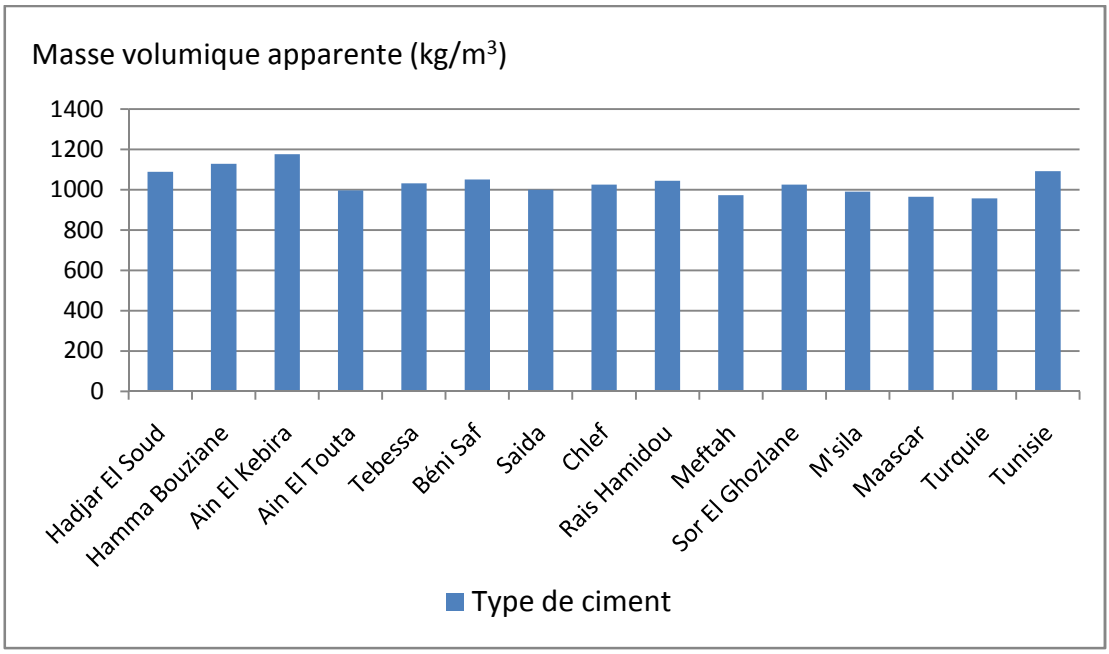


Fig. III.4 : Masse volumique apparente des différents ciments utilisés.

La masse volumique apparente dépend aussi du clinker, sa finesse, la nature de l'ajout et la teneur de substitution du ciment ainsi que leur porosité. A titre d'exemple, le CEMII/A 42.5 importé de la Turquie est le ciment le plus léger, sa masse volumique apparente est de 957 kg/m^3, le CEMII/B 42.5 de Mascara a une masse volumique de 965 kg/m^3, le ciment plus lourd est le CEMII/A 42.5 de Ain El Kebira pour une masse volumique apparente de 1177 kg/m^3.

III.3.3 Consistance sur la pate de ciment composé utilisé

Les mesures de la consistance normales sur pâtes de ciments sont regroupées dans la figure III.5. La teneur en eau est généralement comprise entre 26 et 32% de la masse du ciment [84], ici on remarque que les 14 types de ciments composés étudiés ont des consistances normales situées entre 23.4 et 26.4% à l'exception du CEMII/A 42.5 importé de la Turquie qui a une consistance normale de 35% où le recours au réducteur d'eau est indispensable pour abaisser cette consistance. La consistance élevée de ce ciment est due principalement à l'ajout silice et à sa finesse élevée (5208 cm^2/g).

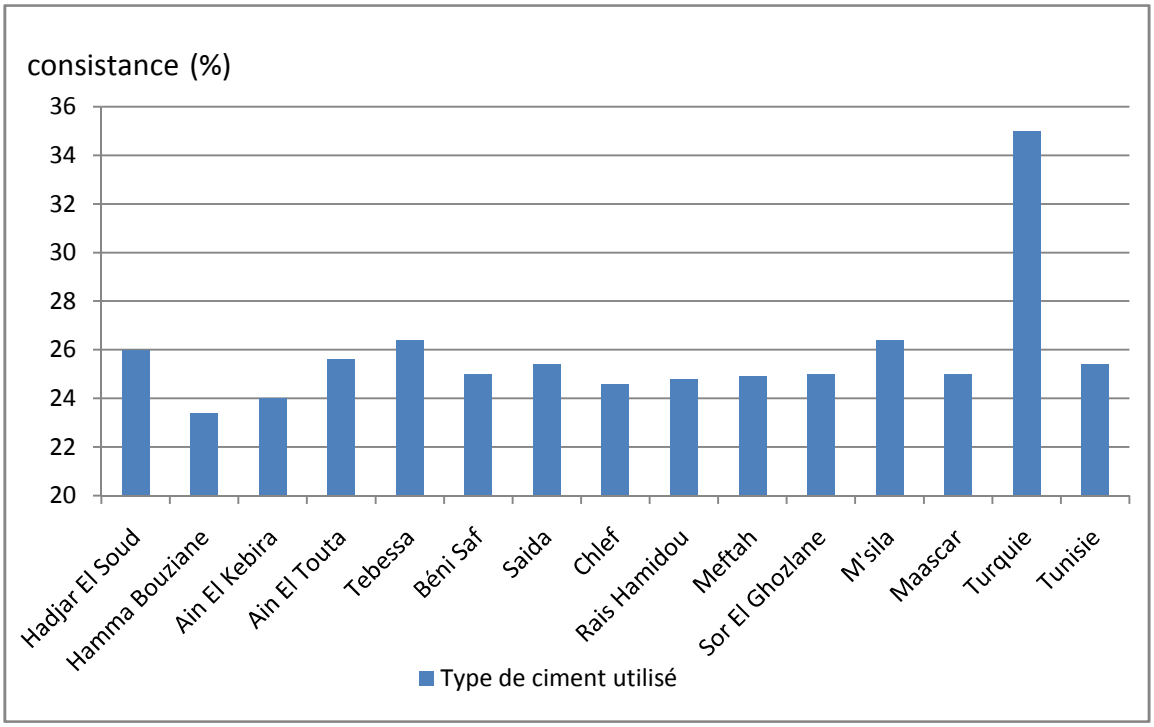


Fig. III.5 : Consistance normale des différents ciments utilisés.

L'effet de la finesse sur la consistance est aussi observé lorsqu'on compare des ciments contenant le même ajout. Par exemple, la consistance a augmenté de 26% à 26.4% pour les finesses de 3379 cm^2/g et 4441 cm^2/g pour les ciments de Hadjr Soud et Tébessa, respectivement contenant le laitier.

L'augmentation de finesse augmente la surface totale des grains qu'il faut mouiller et la grande proportion des vides que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pate de ciment.

III.3.4 Temps de début et fin de prise des ciments composés utilisés

La figure III.6 et III.7 présente le début et la fin de prise des pates des ciments composés utilisés. Tous les ciments ont présenté un début de prise reste conforme aux normes (un minimum de 60 minutes pour les ciments de classes de résistance 42.5 et 52.5 et 90 minutes pour les ciments de classes de résistance de 32.5 [27]. Les ciments qui présentent des temps de début de prise lents sont utilisés pour des chantiers les plus loin par rapport à la centrale de béton en matière de transport.

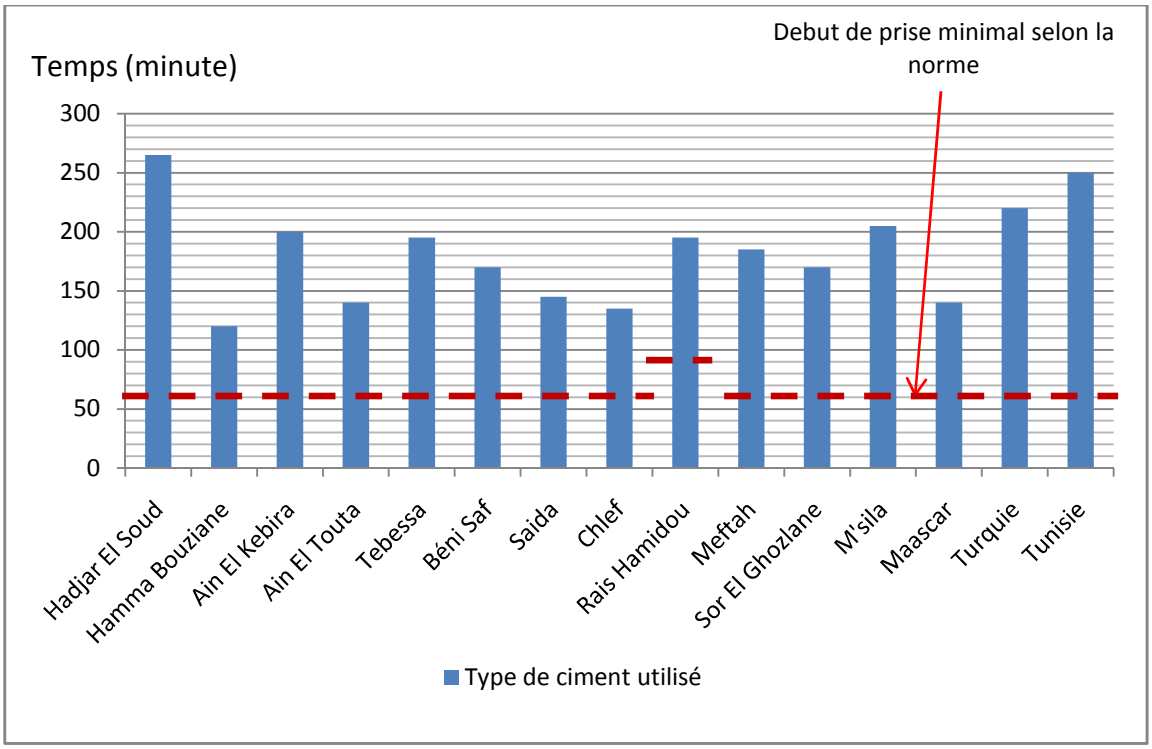


Fig. III.6.a : Temps de début de prise des différents ciments utilisés.

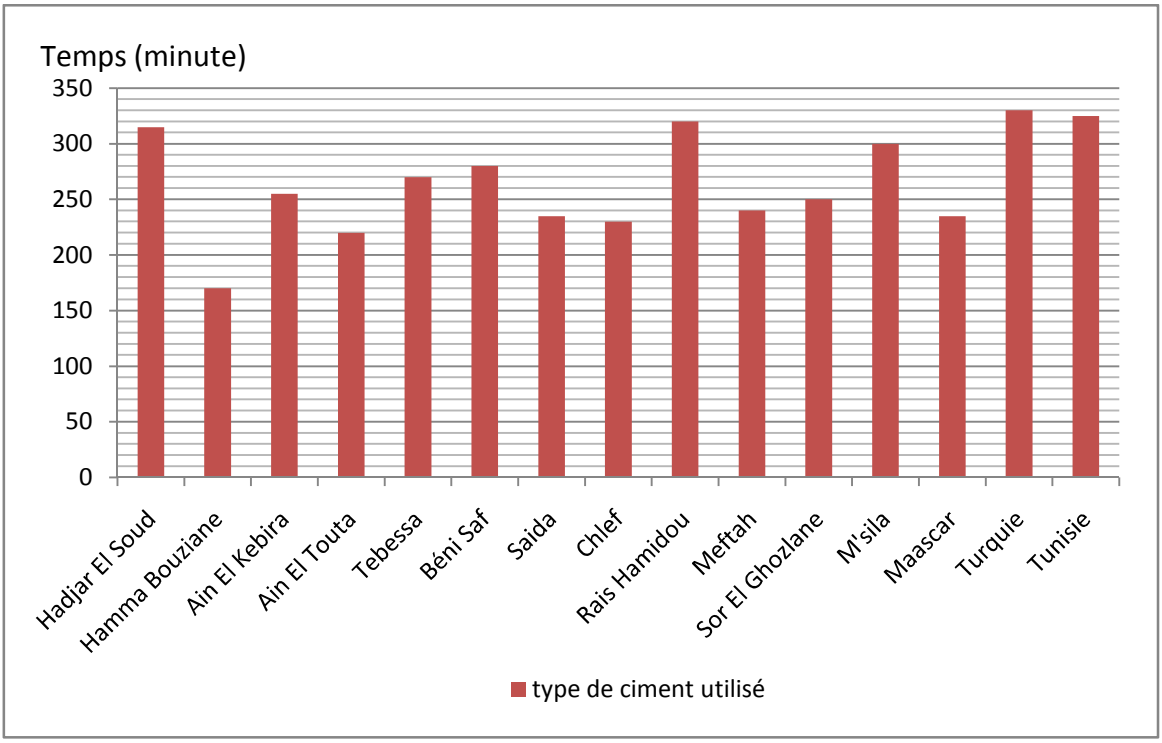


Fig. III.6.b : Temps de fin de prise des différents ciments utilisés.

Le CEMII/A 42.5 de Hama Bouziane avec 10% d'ajout tuf et une finesse de 3135 cm^2/g présente le temps de début de prise le plus faible de 120 minutes. Cela est du à la teneur maximale en C_3A (12%) qu'il contient ce ciment et à la quantité d'eau (23.4%) qui est inferieure à celles des autres ciments utilisés pour avoir la consistance normale.

L'augmentation de la finesse accélère la prise. Lorsque la finesse a augmenté de 3379 cm^2/g à 4441 cm^2/g pour les deux ciments contenant le laitier celui de Hadjr Soud et Tébessa respectivement, le temps de prise a diminué de 265minutes à 195 minutes.

L'augmentation de la finesse de mouture des ciments accélère la réaction pouzzolanique à court terme et la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus rapide. Par conséquent, les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en grande quantité aux très jeunes âges [33].

L'ajout calcaire accélère la prise de ciment en raison de la réaction entre $CaCO_3$ du calcaire et le C_3A du ciment [31, 85, 86]. Les ciments contenant du calcaire comme ceux d'Ain Touta, Mascar et Meftah ont effectivement montré les temps de prise les plus rapides.

III.3.5 Expansion à chaux (stabilité)

Les résultats de l'expansion à chaux sont résumés dans la figure III.7.

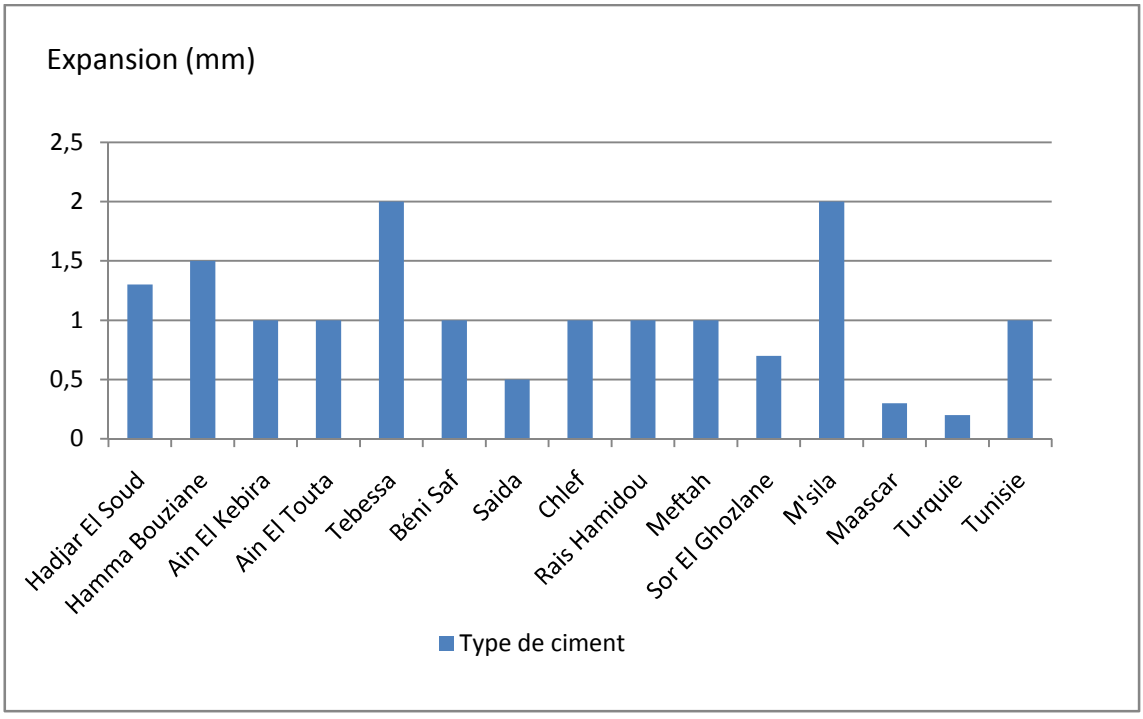


Fig. III.7 : L'expansion à chaux (stabilité) des différents ciments utilisés.

Toutes les valeurs trouvées de l'expansion à chaud pour l'ensemble des ciments composés utilisés restent inferieurs à la limite maximale imposée par les normes et qui est 10 mm [28].

L'expansion à chaux est influencée principalement par les éléments expansifs dans le ciment comme le MgO, la chaux libre CaO et les sulfates SO_3. Par conséquent, les ciments de Tébessa (1.55% de MgO) et Msila (1.88% de MgO) ont présenté les expansions les plus élevées. L'expansion la plus faible est observée dans les ciments de la Turquie, de Saida et de Mascara probablement de faible quantité des éléments expansifs. Les ciments avec l'ajout de la pouzzolane naturelle semblent avoir une expansion relativement élevée.

III.4 Consistance des mortiers par le maniabilimètre

Les résultats des essais de consistance par le maniabilimètre LCPC sont donnés par la figure III.8.

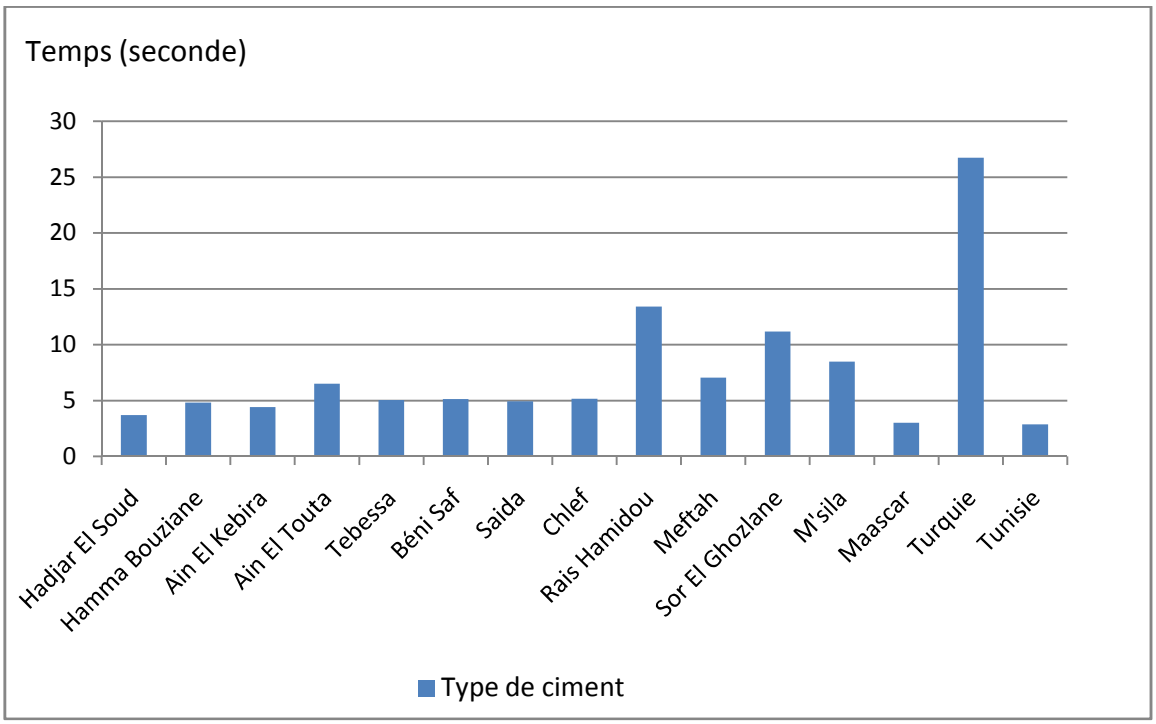


Fig. III.8 : Temps de maniabilité des différents ciments utilisés.

La maniabilité du mortier dépend principalement du rapport E/C et par conséquent de la finesse du ciment et du type de l'ajout. La grande valeur du temps d'écoulement de 26.72 secondes a été observée pour le ciment importé de la Turquie qui présente la finesse la plus élevée.

Les ciments contenant le laitier (Hadjr Soud, Ain Kebira et Tébessa) ont présenté des maniabilités plus élevé en comparaison à ceux contenant du calcaire (Rais Hamidou, Sour El Ghozlane et Msila). Le laitier améliore la maniabilité en raison de la forme sphérique de ces grains contrairement au calcaire qui consomme plus l'eau et réduit en conséquence la maniabilité.

III.5 Evolution de la résistance à la compression du mortier

Les résultats de la résistance à la compression sont représentés le tableau III.4. Les résultats présentés sont le moyen de six (06) éprouvettes. Afin de bien comprendre l'évolution de la résistance à la compression à jeune âge (2 et 7 jours) et à long terme (28, 90 et 180 jours), les résultats sont présentés dans les figures III.9, III.10.a et III.10.b.

On observe que la résistance à la compression augmente avec l'âge et cela pour l'ensemble des types des ciments composés étudiés. Cette augmentation est due au développement de l'hydratation en fonction du temps.

Les ciments présentant des finesses élevées ($\geq$4500 cm^2/g) (Turque, Meftah et Ain Touta) ont donné les résistances les plus élevées à jeune âge. Cependant, le ciment de Béni Saf a donnée des résistances élevées à jeune âge même avec une finesse Moyenne (3716 cm^2/g) probablement en raison de C_3S élevé.

L'addition des fillers calcaires semble aussi à améliorer la résistance à jeune âge en raison de la réaction entre le $CaCO_3$ et le C_3A du ciment. Ceci est observé par les ciments de Sour El Ghozlane, Meftah, et Ain Touta. L'augmentation de la résistance à jeune âge est due selon Borgholm [88] à l'hydratation accélérée de l'alite du ciment en présence du calcaire. En effet, il est montré par calorimétrie, que l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) est plus rapide en présence du calcaire [28]. L'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de « nucléation hétérogène » où la germination du silicate de calcium hydraté (C-S-H) se produit plus facilement au contacte des grains de calcaire. Cette germination entraine une précipitation plus rapide des C-S-H et donc, aussi de la pentlandite $Ca(OH)_2$ et par conséquence une augmentation de la résistance. Par contre, l'addition du laitier connu par son hydraulicité latente, a donné les résistances les plus faibles à jeune âge (Hadjr Soud, Ain Kebira).

Tableau III.4 : Résistance à la compression à différents âges des ciments utilisés.

Type de ciment	Résistance à la compression des éprouvettes en mortier (MPa)							
	Age (jour)	2	7	R_{2j}/R_{28j}	28	90	R_{180j}/R_{28j}	180
Hadjar El Soud	Rcmoy	13,76	28,55	0,28	49,40	57,86	1,26	62,45
	σ	0,59	1,84		2,48	2,94		4,11
Hamma Bouziane	Rcmoy	16,70	39,09	0,38	43,87	50,52	1,27	55,62
	σ	1,02	1,61		2,64	3,45		2,71
Ain El Kebira	Rcmoy	16,47	36,37	0,36	46,03	52,71	1,15	53,11
	σ	1,04	2,04		3,83	2,73		1,62
Ain El Touta	Rcmoy	25,41	38,10	0,57	44,90	56,19	1,36	61,08
	σ	1,96	2,30		1,79	3,98		4,79
Tebessa	Rcmoy	18,55	32,02	0,46	40,43	46,50	1,18	47,83
	σ	0,75	1,26		2,48	2,61		2,11
Béni Saf	Rcmoy	22,12	40,70	0,42	52,22	61,83	1,22	63,89
	σ	0,57	1,22		2,90	5,00		5,52
Saida	Rcmoy	16,37	32,76	0,41	40,13	45,79	1,15	46,22
	σ	0,71	1,39		1,83	2,38		1,93
Chlef	Rcmoy	16,27	38,56	0,37	43,74	46,42	1,11	48,49
	σ	0,31	0,95		5,50	2,68		1,78
Rais Hamidou	Rcmoy	14,50	35,63	0,31	46,24	50,79	1,16	53,49
	σ	1,44	1,82		2,17	3,35		1,58
Meftah	Rcmoy	25,42	37,27	0,59	42,87	51,06	1,32	56,77
	σ	1,50	1,27		2,11	6,00		4,90
Sor El Ghozlane	Rcmoy	21,83	37,31	0,47	46,28	52,40	1,20	55,65
	σ	0,80	2,25		0,82	2,54		1,64
M'sila	Rcmoy	24,06	37,98	0,56	42,61	43,23	1,12	47,57
	σ	1,78	1,40		1,12	3,38		2,38
Maascar	Rcmoy	20,29	31,95	0,47	42,83	43,13	1,06	45,32
	σ	1,13	1,01		1,78	3,60		1,31
Turquie	Rcmoy	31,18	43,34	0,57	54,29	64,05	1,25	67,69
	σ	2,69	1,56		1,92	3,09		1,08
Tunisie	Rcmoy	16,43	30,96	0,30	54,14	60,48	1,22	65,98
	σ	0,56	1,93		1,84	4,48		3,99

Le rapport R_{2j}/R_{28j} varie de 0.28 à 0.59 selon le type de ciment. Les rapports les plus élevés sont ceux des ciments présentant des finesses élevées ou un C_3S élevé.

Les ciments ayant présenté une résistance à 2 jours supérieure à 20 MPa peuvent être classés comme des ciments CEMI 42.5 R. Par contre, certains ciments (Tébessa et Saida) n'ont pas satisfait le critère de la résistance minimale à 28 jours de 42.5 et par conséquent ne peuvent pas être classés comme CEMII/A 42.5.

La résistance à la compression continue à se développer à long terme. Le rapport R_{180j}/R_{28j} varie de 1.06 à 1.36. Les rapports les plus élevées ont été obtenu avec les ciments contenants des ajouts pouzzolaniques (laitier et pouzzolane). Ceci montre l'effet bénéfique de ces ajouts à long terme.

L'addition de calcaire réduit la résistance à la compression à long terme. Cependant, le broyage à une finesse élevée donne un effet compensatoire et la perte de résistance à long terme est négligeable.

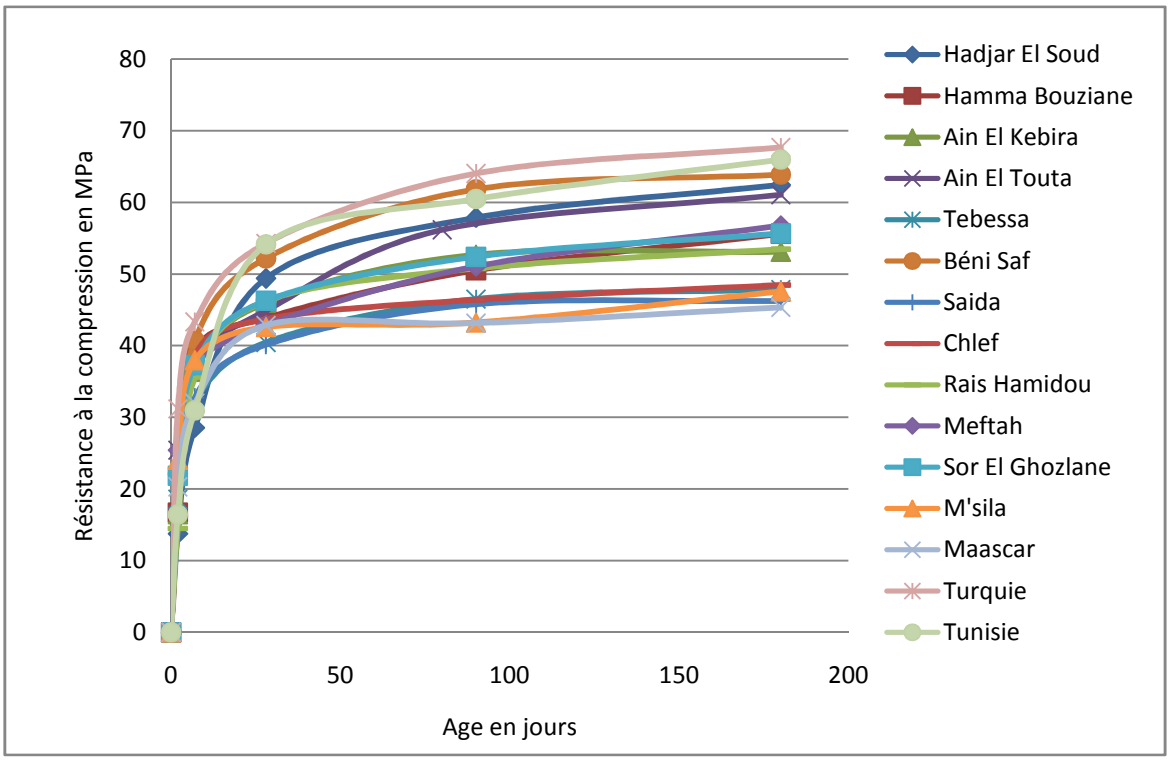


Fig III.9: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des différents ciments utilisés.

Le laitier présente une bonne réactivité hydraulique, à partir de 28 jours, s'hydrate en présence de $Ca(OH)_2$ libérée par l'hydratation du clinker et confère au ciment une résistance comparable, sinon supérieure à celle du ciment Portland sans ajout [1]. Hadj Sadok a trouvé que l'incorporation de taux de laitier inférieurs à 30% est possible sans affecter les propriétés mécaniques du béton avec un rapport E/C élevée (0.65), la diminution de ce rapport à 0.42 conduit néanmoins, à une résistance satisfaisante des bétons au laitier même avec un taux de 50% particulièrement à long terme [88].

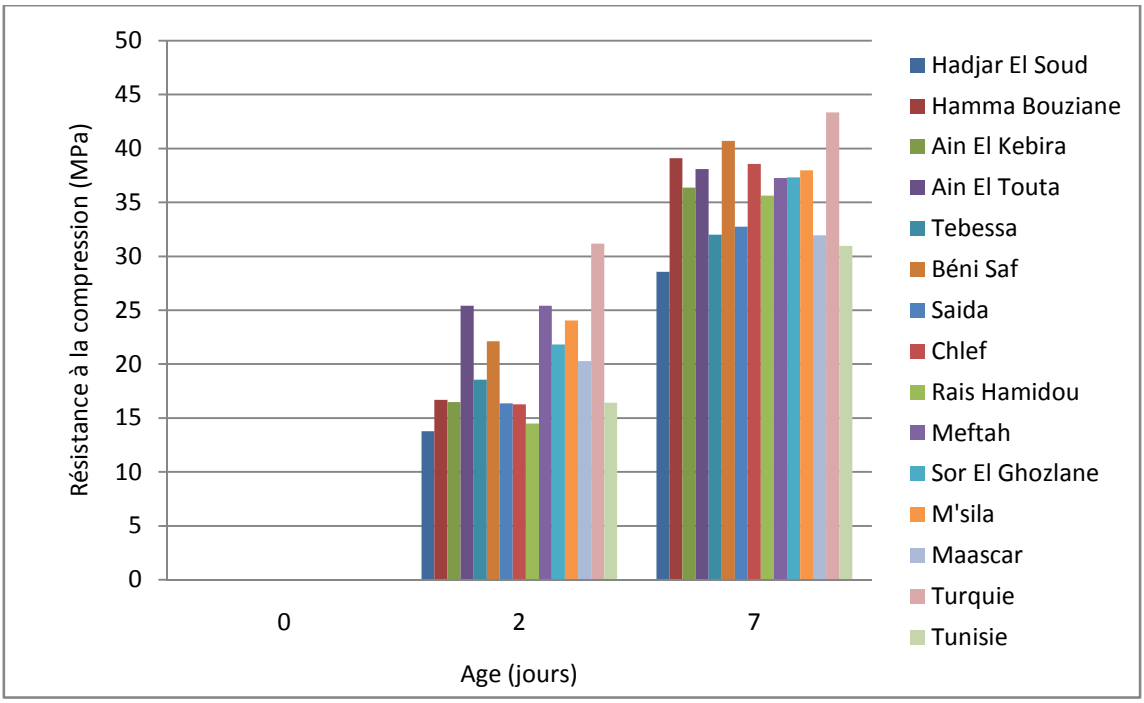


Fig. III.10.a : Résistance à la compression à jeune âge (court terme) des différents ciments utilisés (2 et 7 jours).

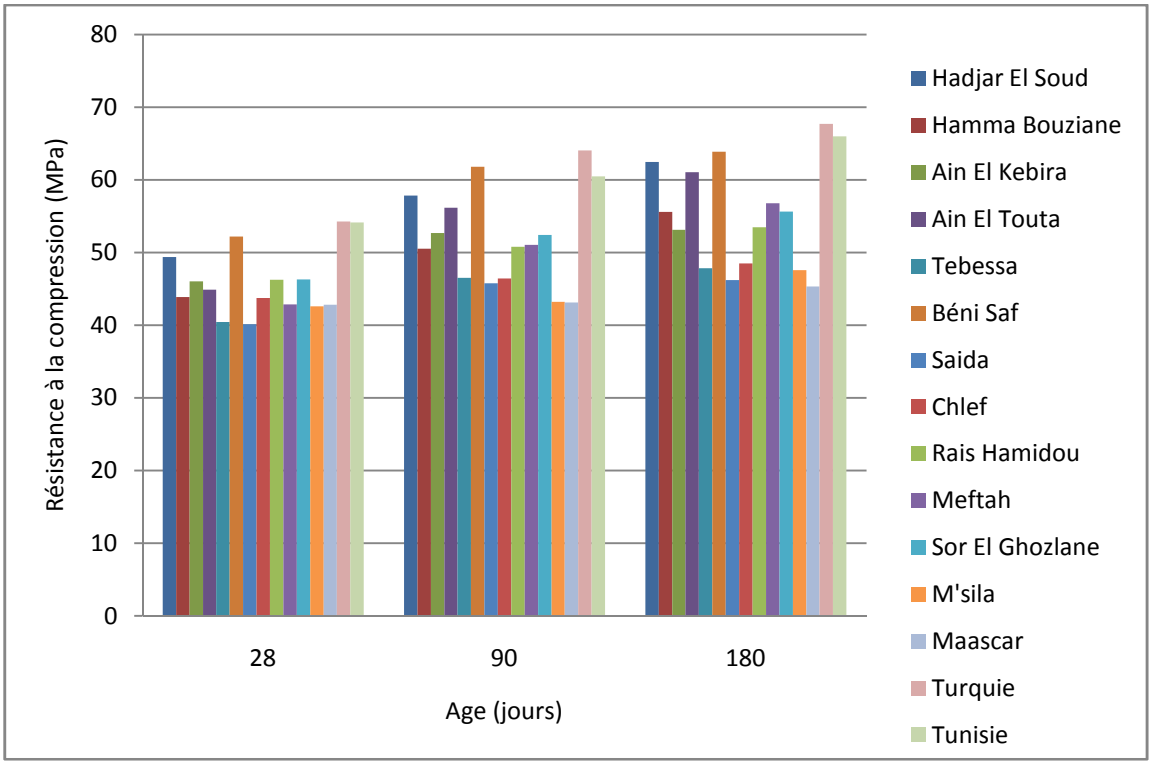


Fig. III.10.b : Résistance à la compression à long terme (28, 90 et 180 jours) des différents ciments utilisés.

III.6 Evolution de la résistance à la flexion du mortier

Les résultats de la résistance à la flexion des éprouvettes en fonction du type de ciments étudiés sont regroupés dans le tableau III.5 et la figure III.11. Les résultats de la résistance à la flexion montrent un développement en fonction de l'âge similaire que celui observé avec la résistance à la compression. Ceci est dû à l'évolution de l'hydratation avec le temps.

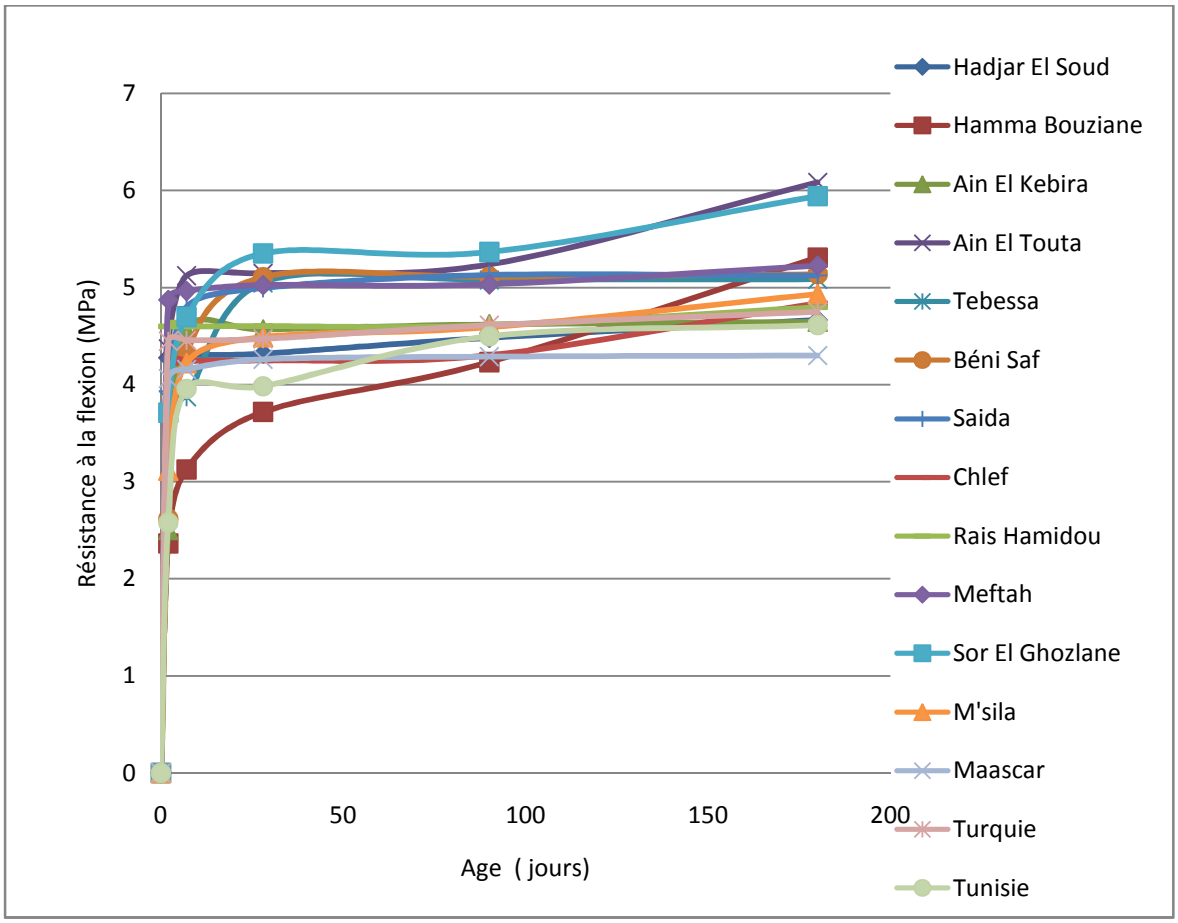


Fig. III.11: Evolution de la résistance à la à la flexion en fonction de l'âge des différents ciments utilisés.

Les figures III.12.a et III.12.b comparent les résistances à court et à long terme des différents ciments testés. La résistance à la flexion augmente avec l'âge pour tous ciments. A 2 jours, la résistance à la flexion varie de 2.36 MPa à 4.87 MPa. A 28 jours, cette résistance est de l'ordre de 3.72 MPa à 5.35 MPa.

Tableau III.5 : Résistance à la flexion des à différents âges des ciments utilisés.

Type de ciment	Résistance à la flexion des éprouvettes en mortier (MPa)							
	Age (jour)	2	7	R_{2j}/R_{28j}	28	R_{180j}/R_{28j}	90	180
Hadjar El Soud	Rfmoy	4,28	4,30	0,99	4,32	1,08	4,48	4,67
	σ	0,31	0,62		1,05		0,72	0,59
Hamma Bouziane	Rfmoy	2,36	3,13	0,64	3,72	1,43	4,23	5,31
	σ	0,27	0,28		0,28		0,60	0,76
Ain El Kebira	Rfmoy	2,50	4,55	0,55	4,57	1,02	4,62	4,65
	σ	1,01	0,48		1,00		0,64	1,53
Ain El Touta	Rfmoy	4,37	5,12	0,85	5,15	1,18	5,24	6,08
	σ	1,47	0,51		0,34		1,17	0,56
Tebessa	Rfmoy	3,84	3,88	0,76	5,05	1,01	5,08	5,08
	σ	1,71	0,35		0,18		0,47	0,68
Béni Saf	Rfmoy	2,62	4,32	0,51	5,11	1,01	5,11	5,14
	σ	1,13	1,21		0,67		0,40	0,47
Saida	Rfmoy	3,93	4,80	0,79	5,00	1,03	5,13	5,12
	σ	0,85	2,45		1,78		1,51	0,67
Chlef	Rfmoy	4,22	4,25	0,99	4,25	1,14	4,30	4,84
	σ	0,36	0,75		0,50		1,08	0,77
Rais Hamidou	Rfmoy	4,60	4,60	1,00	4,60	1,04	4,61	4,80
	σ	1,11	0,40		0,88		0,70	1,18
Meftah	Rfmoy	4,87	4,96	0,97	5,03	1,04	5,03	5,23
	σ	0,20	0,87		1,18		0,51	1,19
Sor El Ghozlane	Rfmoy	3,71	4,70	0,69	5,35	1,11	5,37	5,94
	σ	0,84	1,34		1,81		0,69	0,51
M'sila	Rfmoy	3,11	4,22	0,69	4,49	1,10	4,59	4,93
	σ	1,33	0,24		0,59		0,36	0,33
Maascar	Rfmoy	4,06	4,16	0,95	4,26	1,01	4,29	4,30
	σ	0,18	0,35		0,56		0,31	0,30
Turquie	Rfmoy	4,45	4,46	0,99	4,47	1,06	4,61	4,75
	σ	0,22	0,35		1,20		0,10	0,16
Tunisie	Rfmoy	2,58	3,96	0,65	3,98	1,16	4,50	4,61
	σ	0,43	1,02		0,25		0,15	0,32

Le rapport R_{2j}/R_{28j} varie de 0.51 à 1.00. Le rapport est plus élevé avec les ciments à finesse élevée et / ou ceux contenant du calcaire. Ce rapport est plus faible pour les ciments à base d'ajouts pouzzolaniques. Par contre, le rapport R_{180j}/R_{28j} qui montre le taux de développement de la résistance à long terme est plus élevé pour ces ciments.

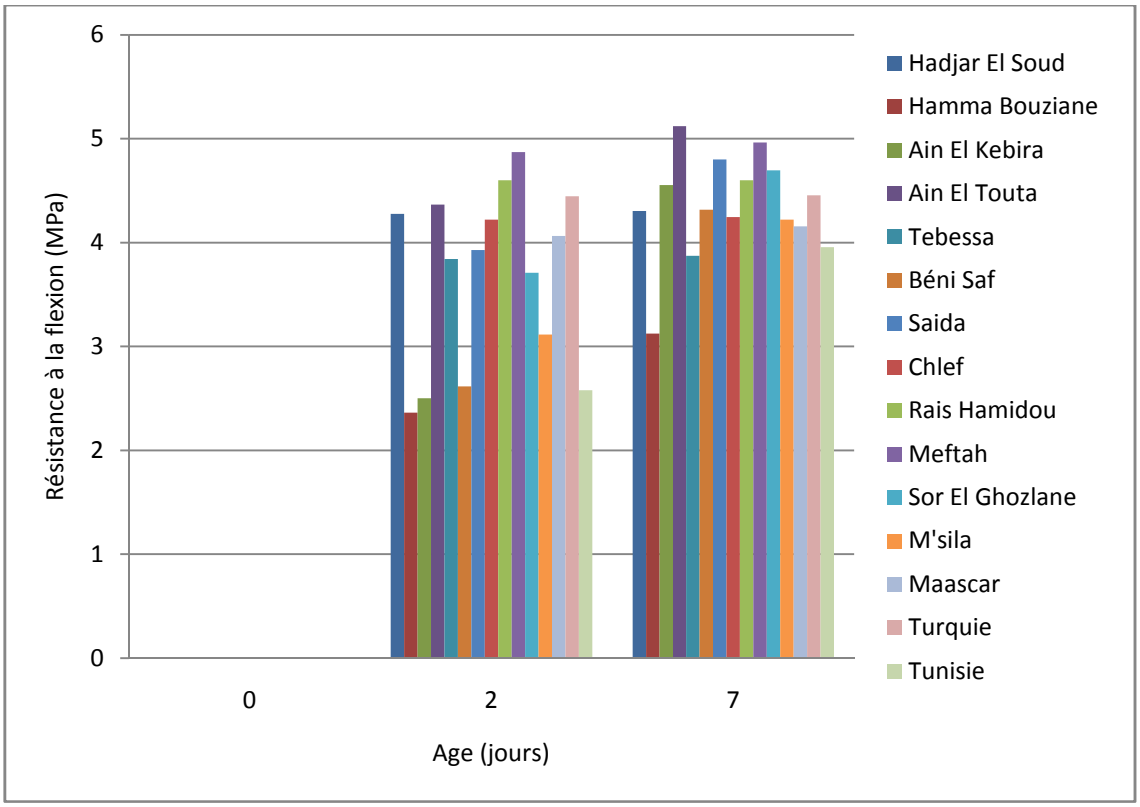


Fig. III.12.a : Résistance la flexion à jeune âge (court terme) des différents ciments utilisés (2 et 7 jours).

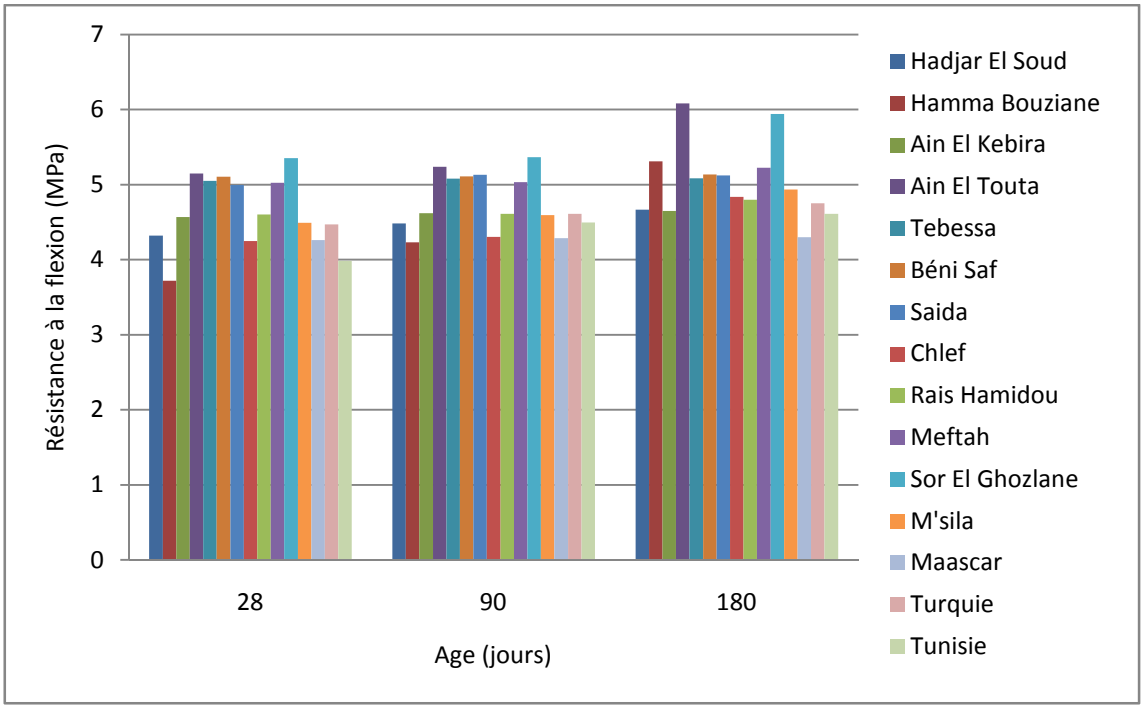


Fig. III.12.b : Résistance la flexion à long terme (28, 90 et 180 jours) des différents ciments utilisés.

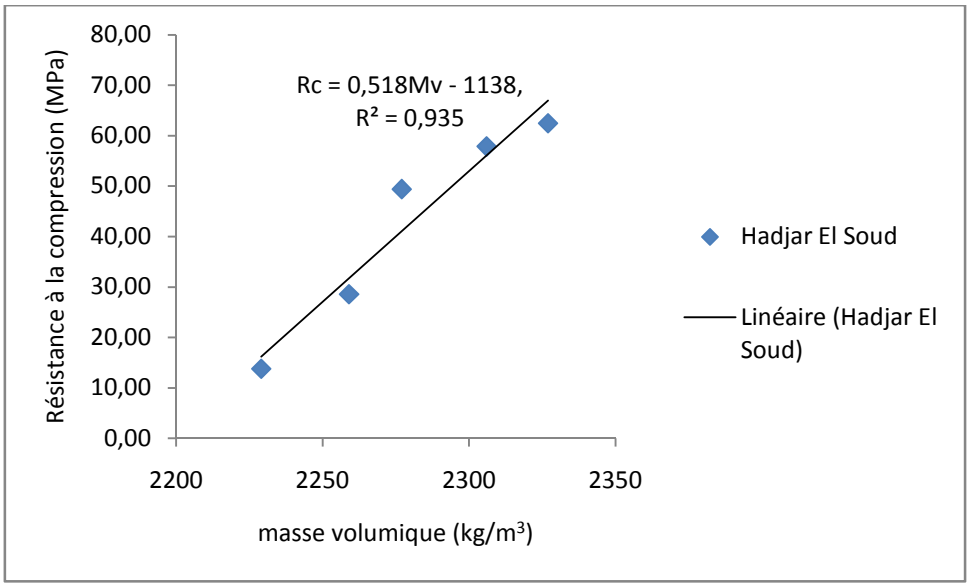
III.7 Masse volumique du mortier

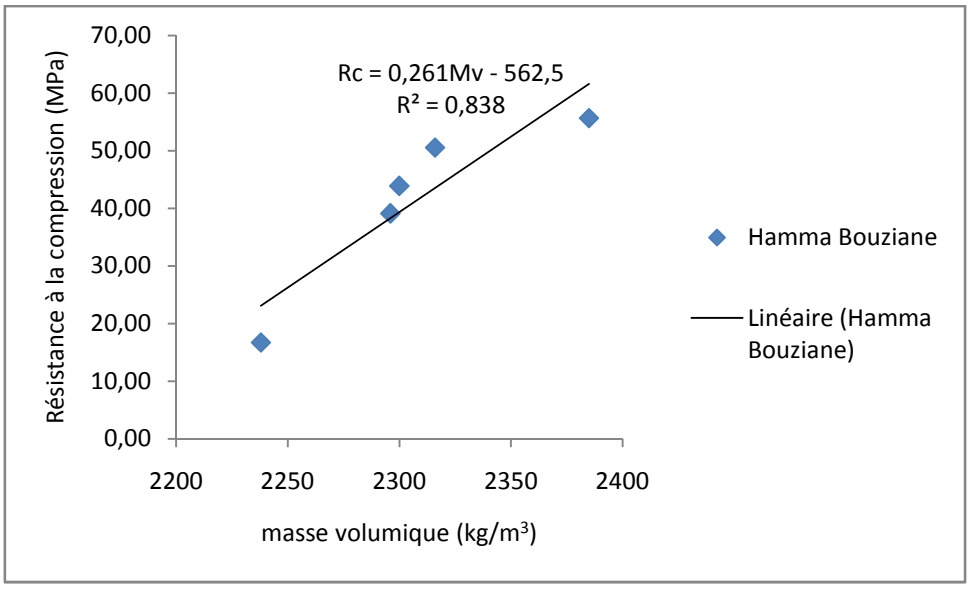
Le tableau suivant montre toutes les masses volumiques des éprouvettes soumises à l'essai de compression et la flexion.

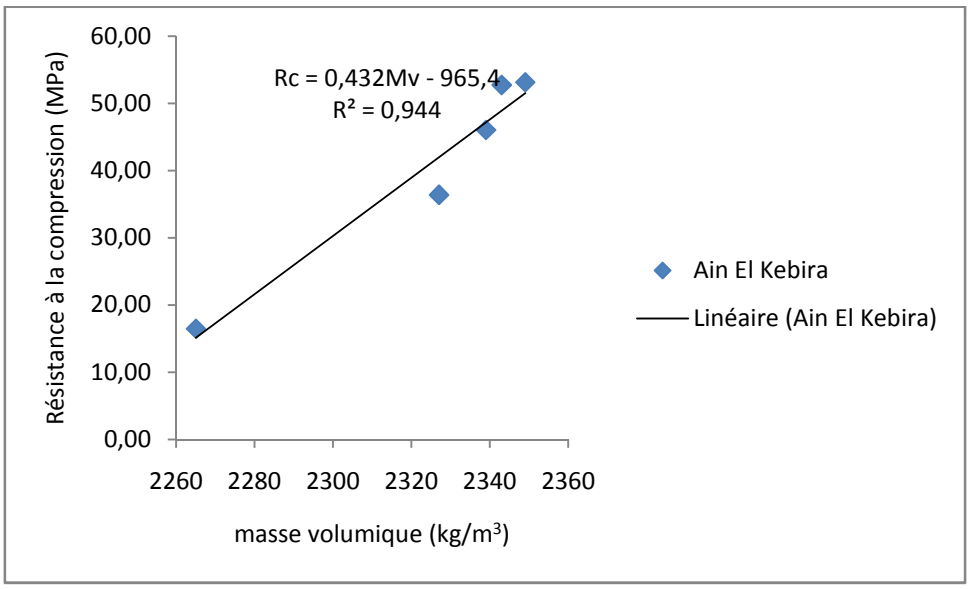
Tableau III.6 : Masses volumiques des mortiers testés.

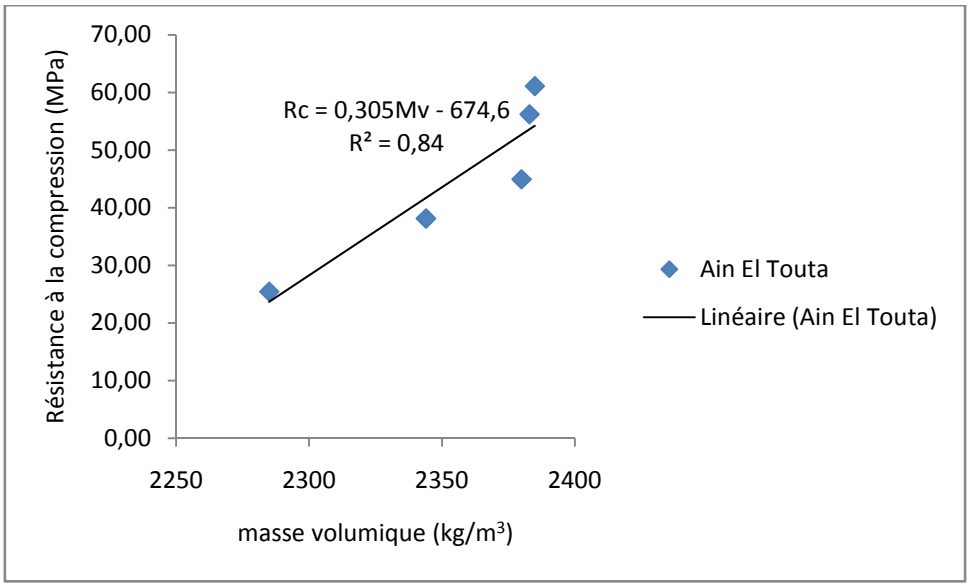
Type de ciment	Masse volumique (kg/m^3)					
	Age (jour)	2	7	28	90	180
Hadjar El Soud	Mvmoy	2229	2259	2277	2306	2327
	σ	3,63	9,60	3,91	16,44	25,19
Hamma Bouziane	Mvmoy	2238	2296	2300	2316	2385
	σ	18,56	15,46	9,59	6,45	6,64
Ain El Kebira	Mvmoy	2265	2327	2339	2343	2349
	σ	5,32	24,16	8,34	16,96	4,66
Ain El Touta	Mvmoy	2285	2344	2380	2383	2385
	σ	9,77	1,26	8,31	14,44	8,23
Tebessa	Mvmoy	2220	2282	2284	2304	2305
	σ	4,53	6,78	26,43	5,69	14,77
Béni Saf	Mvmoy	2275	2341	2343,31	2348	2359
	σ	11,86	7,98	10,20	12,14	7,00
Saida	Mvmoy	2240	2279	2280	2287	2287
	σ	6,07	3,91	219,21	6,61	9,60
Chlef	Mvmoy	2292	2309	2325	2326	2331
	σ	6,88	43,57	11,72	19,58	9,32
Rais Hamidou	Mvmoy	2257	2269	2272	2309	2313
	σ	7,78	13,90	4,21	12,68	2,56
Meftah	Mvmoy	2332	2334	2345	2345	2382
	σ	22,02	39,58	19,46	4,08	38,21
Sor El Ghozlane	Mvmoy	2251	2324	2332	2352	2357
	σ	5,80	17,06	25,84	8,29	19,45
M'sila	Mvmoy	2244	2310	2310	2311	2311
	σ	8,53	19,71	7,48	9,30	9,18
Maascar	Mvmoy	2200	2241	2249	2253	2261
	σ	5,51	9,65	13,65	38,37	44,31
Turquie	Mvmoy	2336	2342	2356	2363	2365
	σ	10,49	31,01	19,35	2,54	22,67
Tunisie	Mvmoy	2301	2323	2356	2369	2371
	σ	7,68	11,56	22,28	25,90	3,96

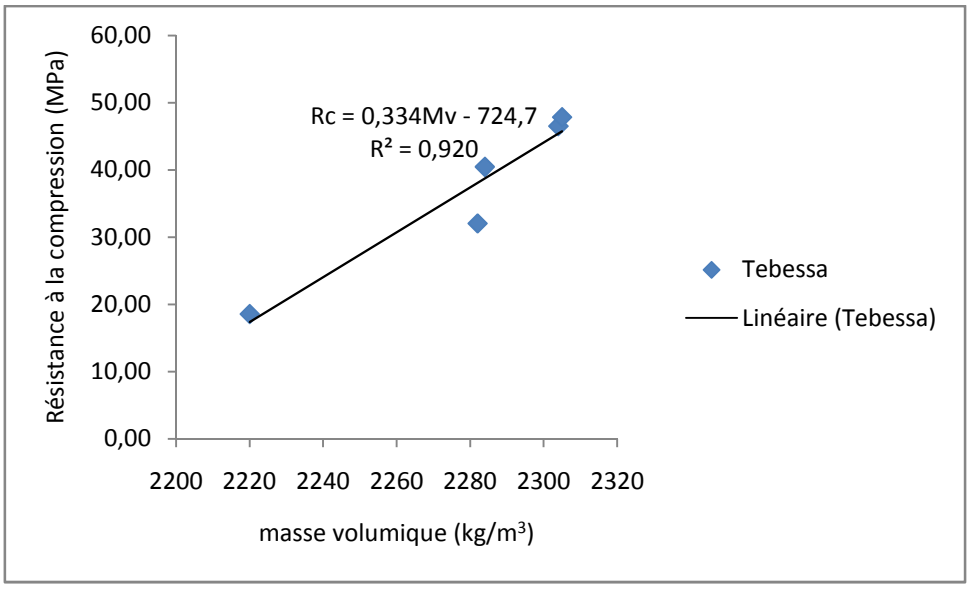
On remarque que la masse volumique augmente avec l'âge en raison du développement de l'hydratation du ciment avec l'âge et le remplissage des pores par les produits d'hydratation.

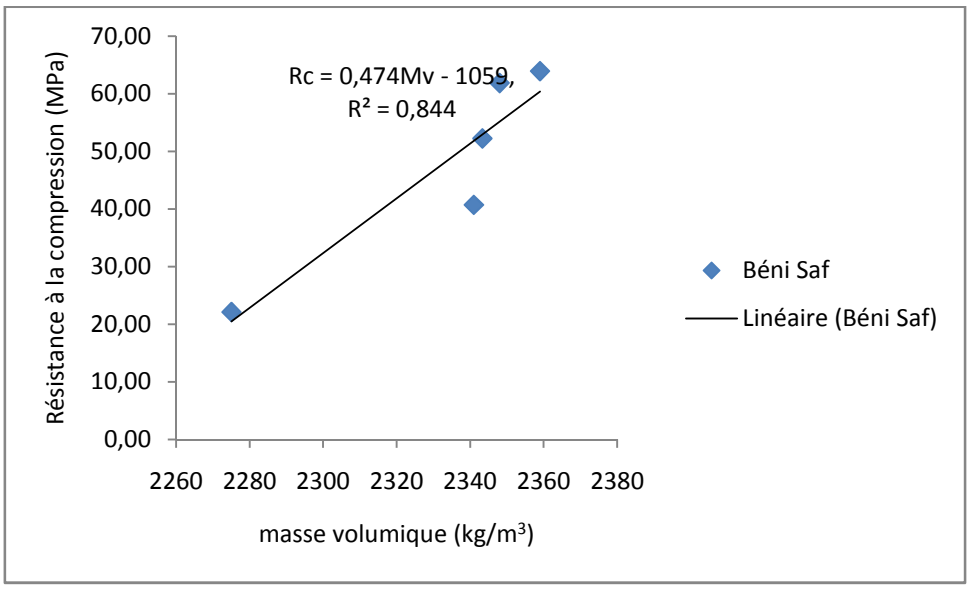

Rc = 0,518Mv - 1138,
R² = 0,935
Résistance à la compression (MPa)
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2200
2250
2300
2350
masse volumique (kg/m³)
Hadjar El Soud
Linéaire (Hadjar El Soud)

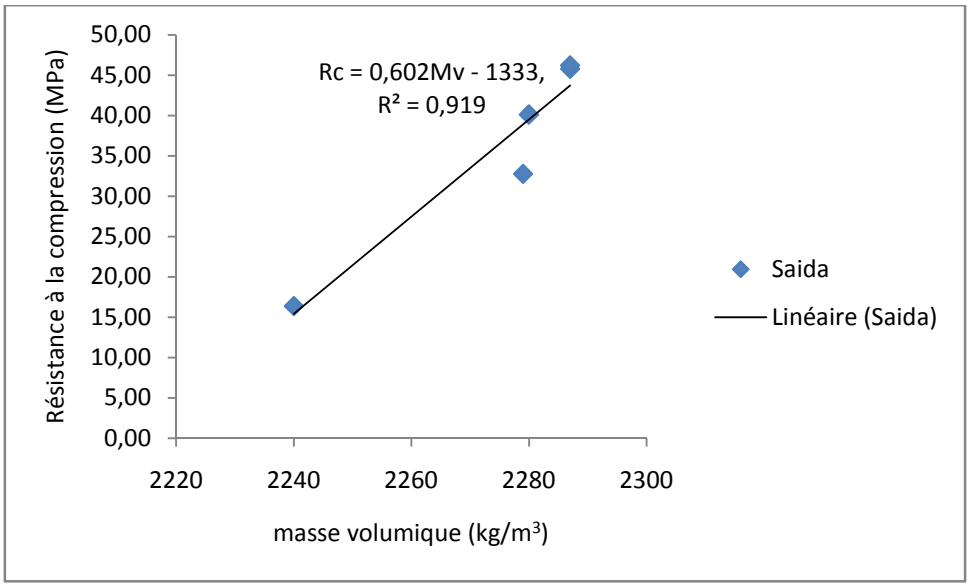

Rc = 0,261Mv - 562,5
R² = 0,838
Résistance à la compression (MPa)
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2200
2250
2300
2350
2400
masse volumique (kg/m³)
Hamma Bouziane
Linéaire (Hamma Bouziane)

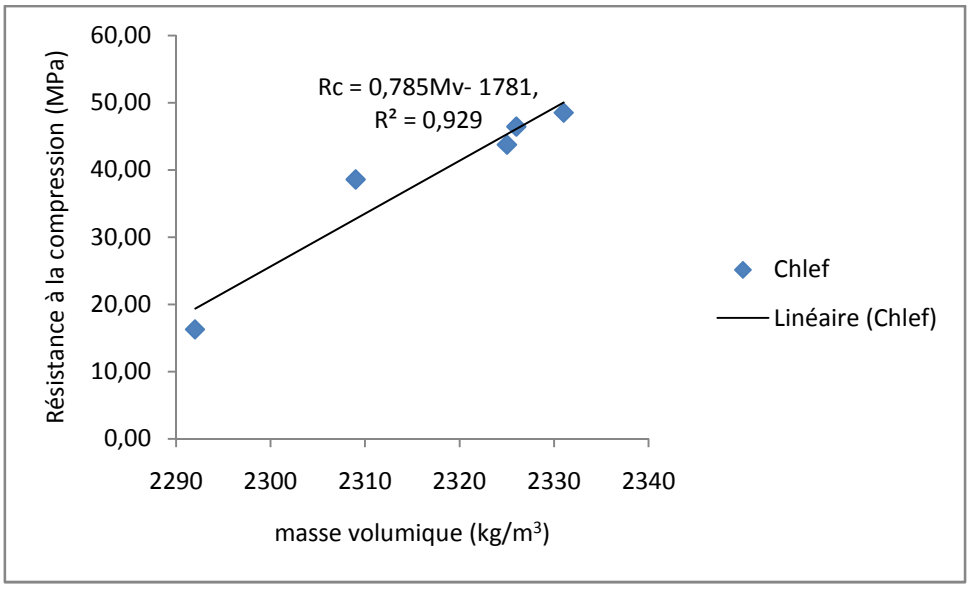

Rc = 0,432Mv - 965,4
R² = 0,944
Résistance à la compression (MPa)
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2260
2280
2300
2320
2340
2360
masse volumique (kg/m³)
Ain El Kebira
Linéaire (Ain El Kebira)

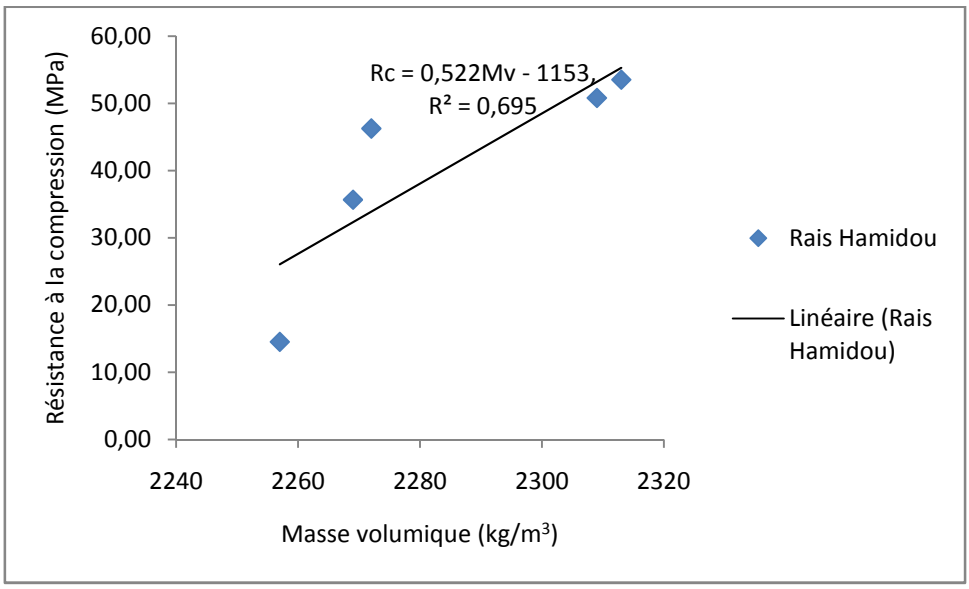

Résistance à la compression (MPa)
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
Rc = 0,305Mv - 674,6
R² = 0,84
2250
2300
2350
2400
masse volumique (kg/m³)
Ain El Touta
Linéaire (Ain El Touta)

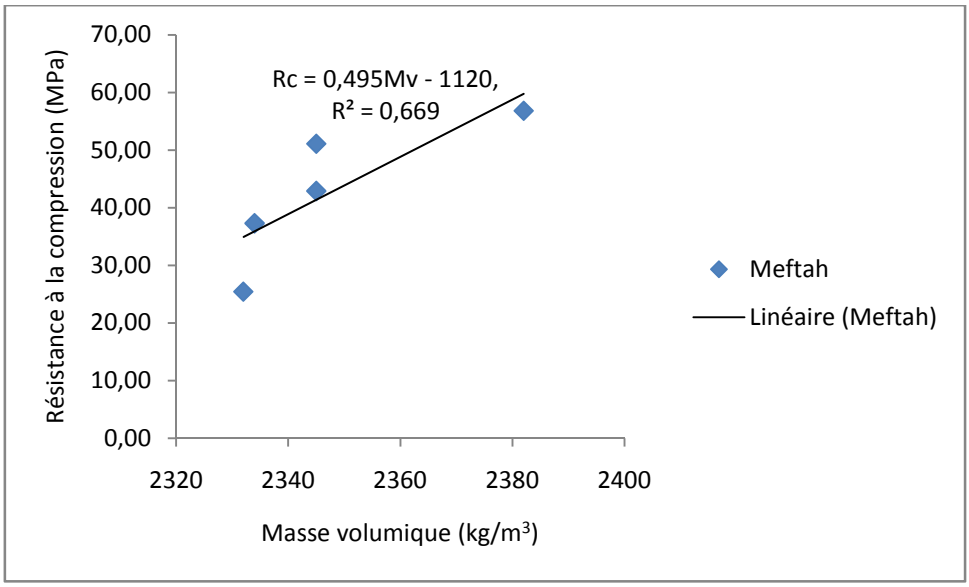

Résistance à la compression (MPa)
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
Rc = 0,334Mv - 724,7
R² = 0,920
2200
2220
2240
2260
2280
2300
2320
masse volumique (kg/m³)
Tebessa
Linéaire (Tebessa)

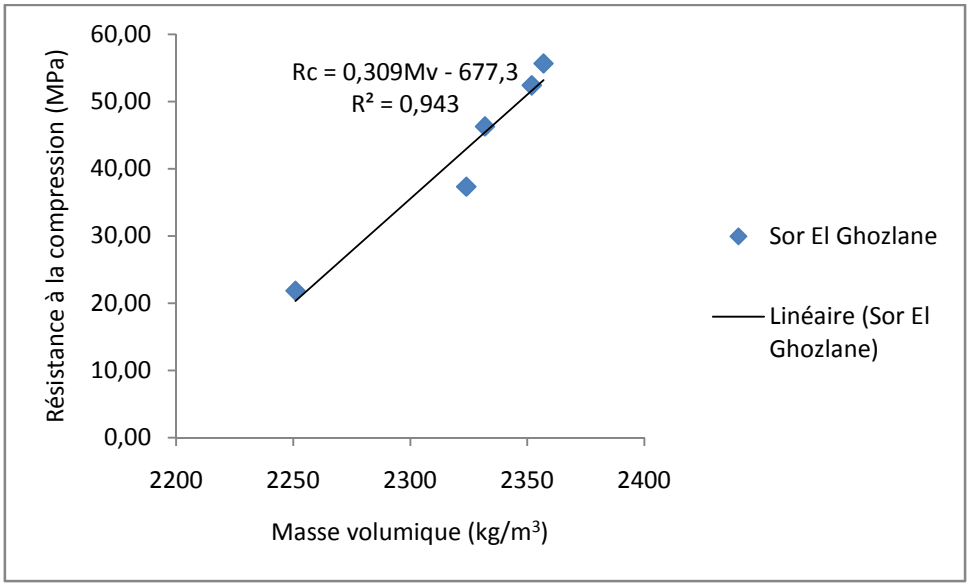

Résistance à la compression (MPa)
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
Rc = 0,474Mv - 1059,
R² = 0,844
2260
2280
2300
2320
2340
2360
2380
masse volumique (kg/m³)
Béni Saf
Linéaire (Béni Saf)

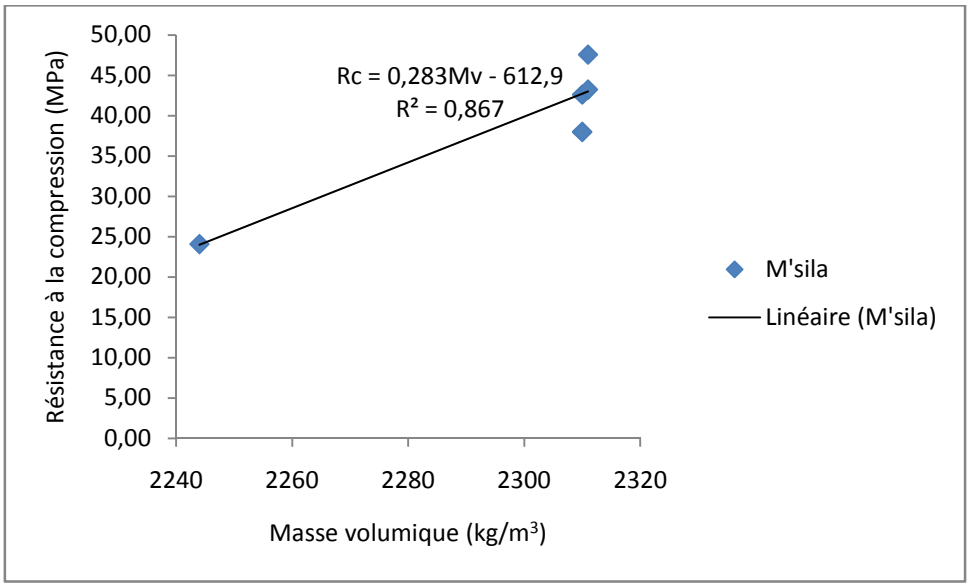

Rc = 0,602Mv - 1333,
R² = 0,919
Résistance à la compression (MPa)
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
2220
2240
2260
2280
2300
masse volumique (kg/m³)
Saida
Linéaire (Saida)


Rc = 0,785Mv- 1781,
R² = 0,929
Résistance à la compression (MPa)
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2290
2300
2310
2320
2330
2340
masse volumique (kg/m³)
Chlef
Linéaire (Chlef)


Rc = 0,522Mv - 1153,
R² = 0,695
Résistance à la compression (MPa)
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2240
2260
2280
2300
2320
Masse volumique (kg/m³)
Rais Hamidou
Linéaire (Rais Hamidou)


Rc = 0,495Mv - 1120,
R² = 0,669
Résistance à la compression (MPa)
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2320
2340
2360
2380
2400
Masse volumique (kg/m³)
Meftah
Linéaire (Meftah)


Rc = 0,309Mv - 677,3
R² = 0,943
Résistance à la compression (MPa)
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
2200
2250
2300
2350
2400
Masse volumique (kg/m³)
Sor El Ghozlane
Linéaire (Sor El Ghozlane)


Rc = 0,283Mv - 612,9
R² = 0,867
Résistance à la compression (MPa)
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
2240
2260
2280
2300
2320
Masse volumique (kg/m³)
M'sila
Linéaire (M'sila)

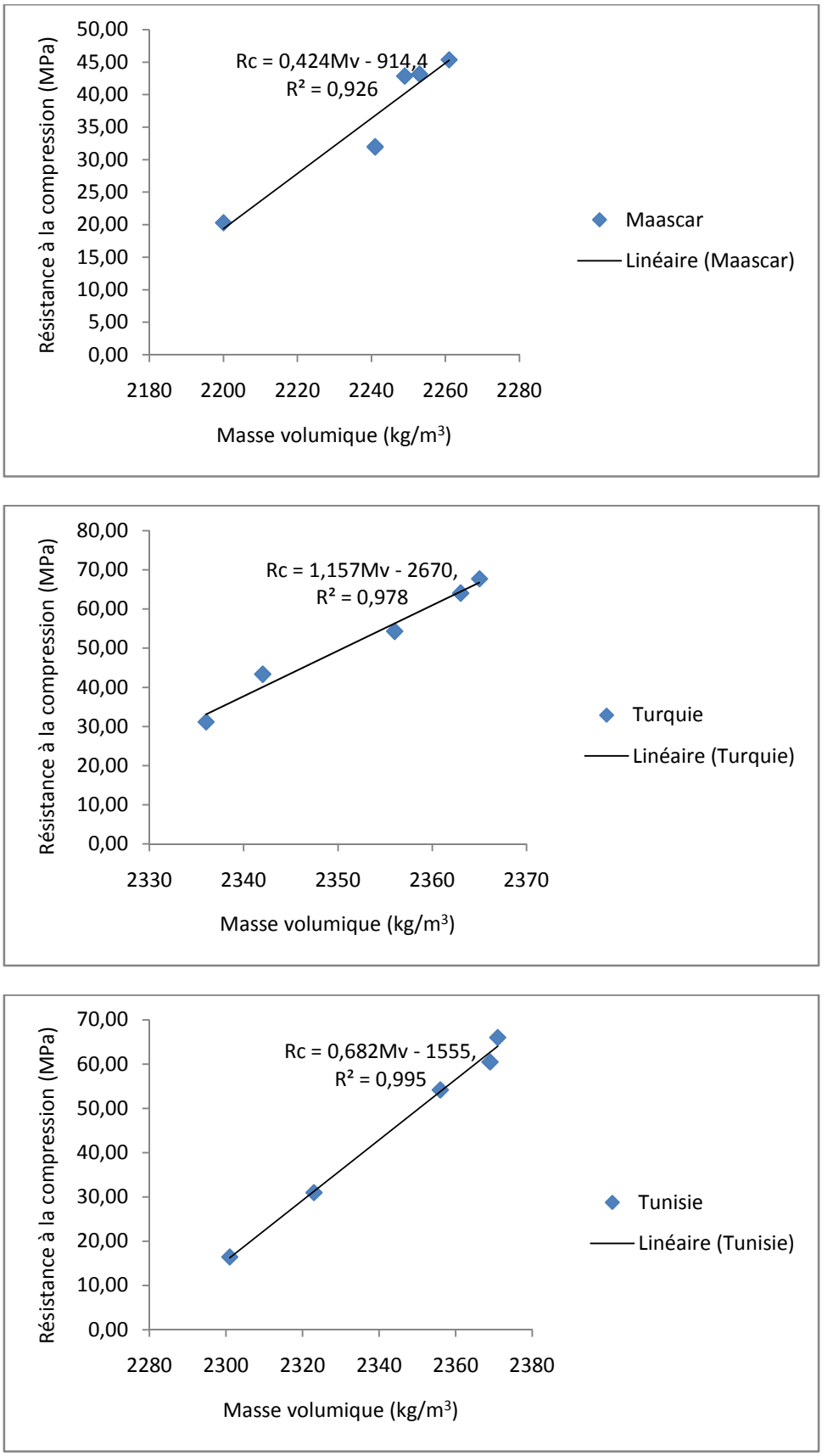


Fig. III.13 : Corrélation entre la masse volumique et la résistance à la compression des différents ciments utilisés.

Les figures III.13 montre une bonne corrélation entre la masse volumique et la résistance à la compression pour chaque ciment utilisé à l'exception des ciments de Rais Hamidou et Meftah qu'ils ont un R^2 inférieur à 0.75.

III.8 Evolution du retrait des différents ciments utilisés

Les résultats de mesure du retrait à court et à long terme que provoque les ciments composés étudiés sont présentés dans la figure III.14.a et III.14.b.

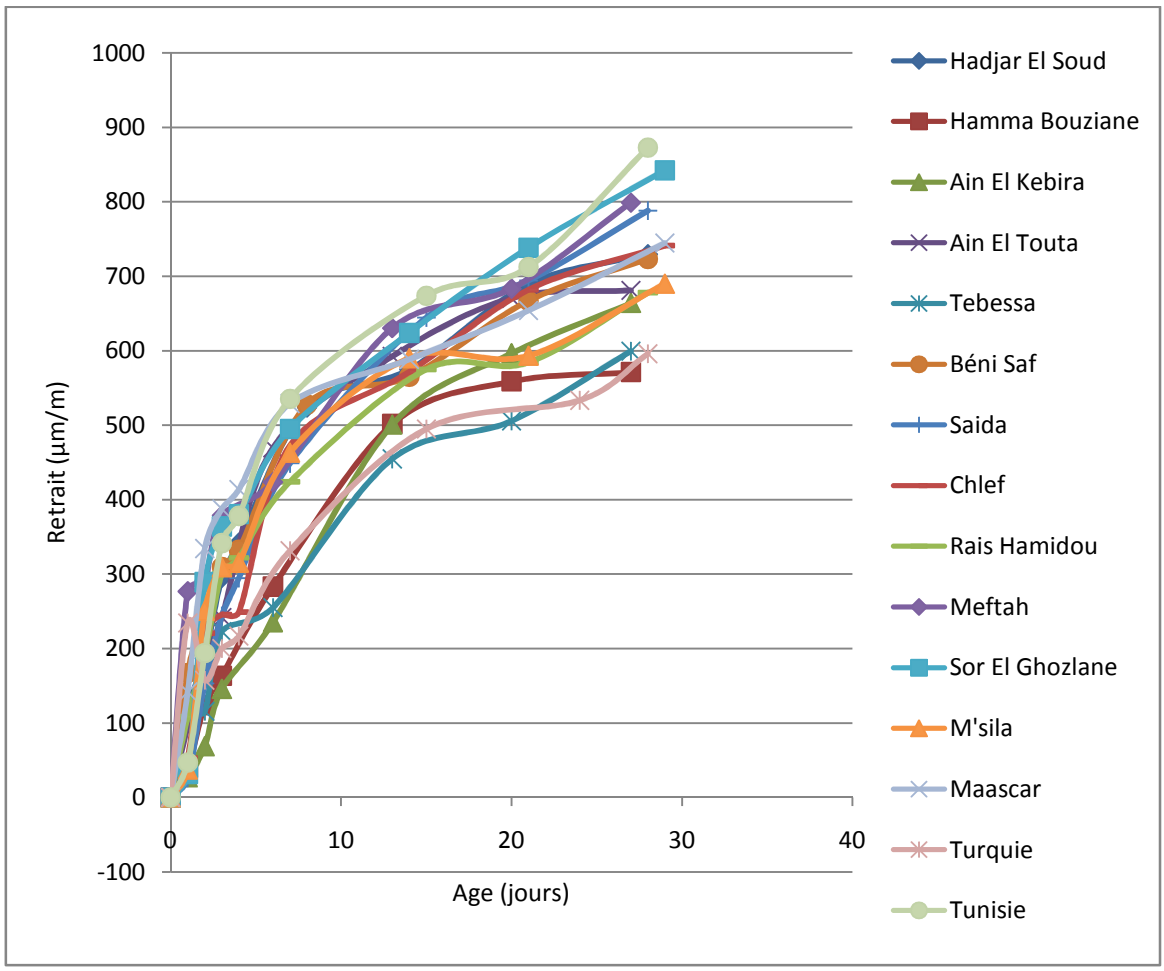


Fig. III.14.a : Evolution du retrait des différents ciments utilisés jusqu'à 28 jours.

Les retraits observés à 28 jours pour tous les ciments testés sont conformes à la norme NF P 15-433 [73] qui spécifie un retrait maximal de 800 µm/m et 1000 µm/m pour les ciments de classe 32.5 et 42.5 respectivement.

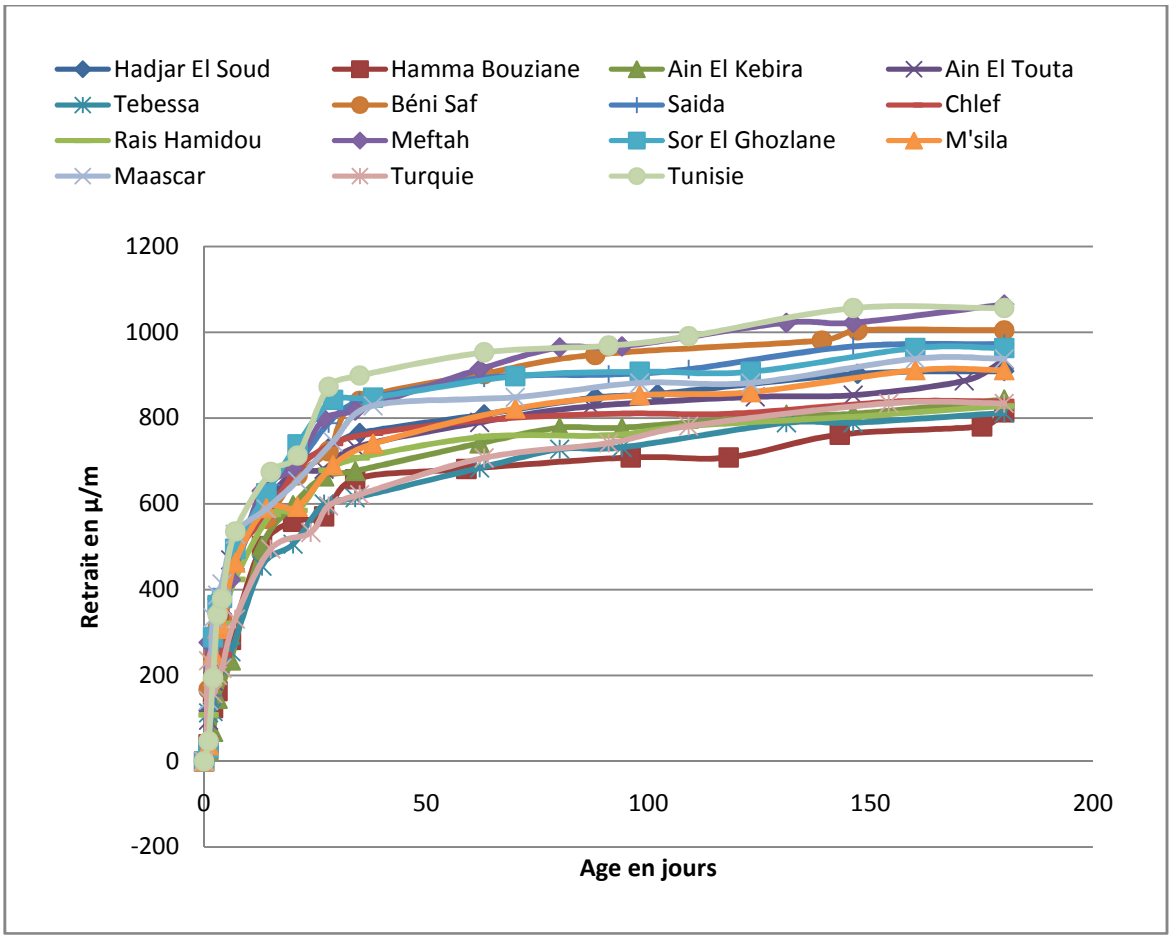


Fig. III.14.b : Evolution du retrait des différents ciments utilisés jusqu'à 180 jours.

Le retrait mesuré sur les ciments testés varie de 811 µm/m à 1056 µm/m à l'âge de 180 jours. Le retrait augmente avec l'âge du mortier mais une stabilisation relative est observée à partir de 60 jours d'âge.

A jeune âge, les ciments à finesse élevée ou avec ajout calcaire ont montré un retrait relativement élevé. A long terme le retrait augmente en raison de la création d'un réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydratés. Lorsque ces capillaires sont saturés d'eau, la consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque un assèchement, cela aboutit à la formation de ménisques où se produisent des forces d'attractions qui provoque les retraits. L'augmentation du retrait est aussi aggravée par la finesse et la présence d'une porosité capillaire élevée. Ceci provoque la formation d'une grande quantité de ménisques et la cinétique d'hydratation devient très rapide à l'intérieure de la pâte de ciment hydraté c'est l'augmentation des forces de traction qui se développent

à l'intérieur des capillaires. Le ciment de Béni Saf a donné un retrait plus élevé après le ciment de la Tunisie et Meftah en raison de l'ajout de l'ajout de tuf d'origine de pouzzolane naturelle qui augmente l'hydratation à long terme et par conséquent le retrait.

III.9 Influence du type de ciment sur l'absorption capillaire (sorptivité)

Les résultats des essais de l'absorptivité sont présentés dans la figure III.15 et III.16. On remarque que l'absorption capillaire augmente avec le temps. Elle plus élevée durant les premières minutes. L'absorption capillaire donne une idée sur les gros pores. Plus la résistance est élevée plus l'absorption est faible, les ciments aux ajouts calcaires ont aussi présenté des absorptions capillaires plus élevées.

Menadi, [91] a constaté dans son étude que le CEMI 32.5 avec les fines calcaires a une valeur d'absorption par capillarité supérieur à la valeur de l'absorptivité du CEMI 42.5 et le CEM II 42.5 A-L.

Said Mansor M. [90] a constaté que l'incorporation de 15% d'ajout de calcaire a un effet négligeable sur la sorptivité. Par contre, Skendar, [91] a aussi observé une faible réduction de la sorptivité pour les bétons contenant 5% de fines calcaires et une légère augmentation de la sorptivité pour 15% à 25% de fines calcaires.

L'incorporation du laitier de haut fourneau et de la pouzzolane naturelle augmente la sorptivité. Selon Hadj Sadok [88], le coefficient de l'absorption capillaire des mortiers au laitier sont plus faibles par rapport au mortier avec ciment sans ajout. Said Mansor [90] a aussi remarqué que l'incorporation de 30% d'ajout de pouzzolane naturelle réduit sensiblement la sorptivité par rapport au ciment sans ajout.

La finesse du ciment accélère l'hydratation. Dans ce cas, les pores de la pâte durcie et les interfaces entre l'agrégat et la pâte de ciment sont remplie par ces ajouts minéraux, et par conséquent, les pores capillaires sont réduits par la formation des gels CSH d'où une réduction de la sorptivité des mortiers. D'ailleurs, le ciment de Sour El Ghozlane et de la Turquie à finesses élevées ont présentés des coefficients d'absorption les plus faibles. L'absorption élevée indique que les pores sont continues et par conséquent le mortier a une faible durabilité par l'arrivé des eaux agressives.

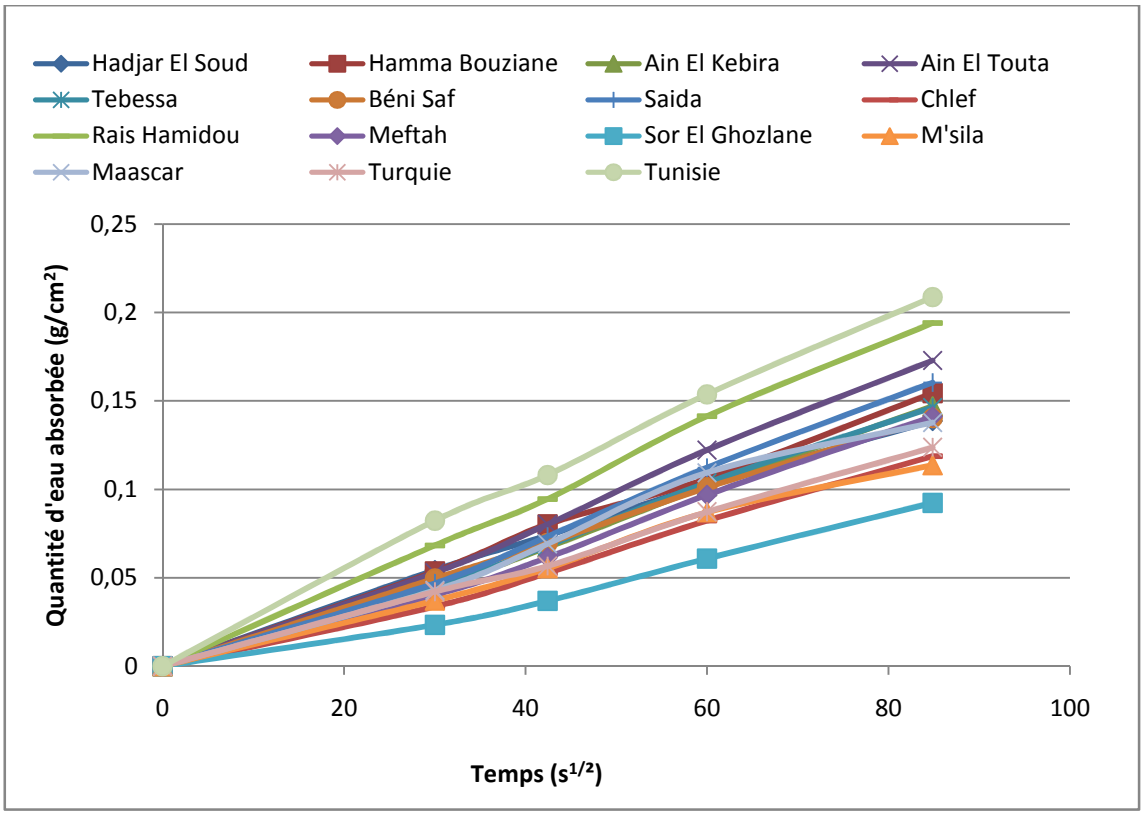


Fig III.15.a : Absorption capillaire du mortier des différents ciments jusqu'à 2 heures.

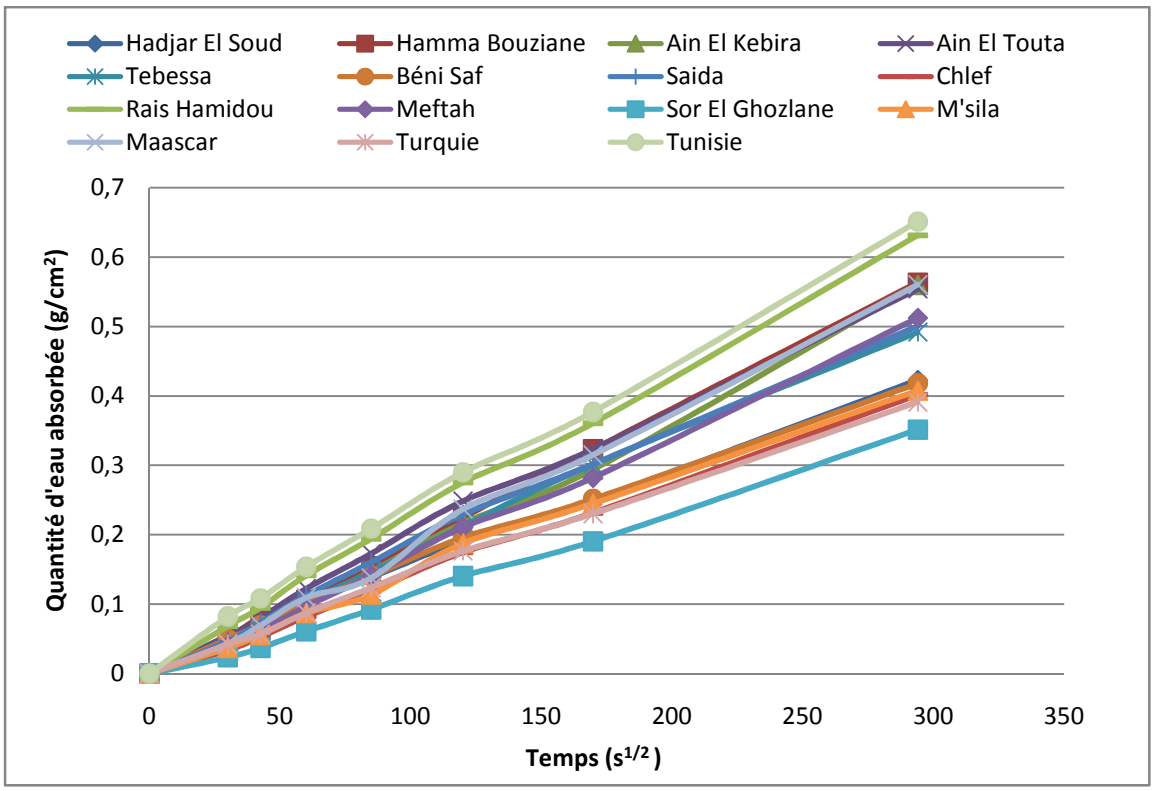


Fig. III.15.b : Absorption capillaire du mortier des différents ciments jusqu'à 24 heures.

L'histogramme suivant mettre en évidence la différence entre les coefficients d'absorptivité de l'ensemble des types de ciment utilisés.

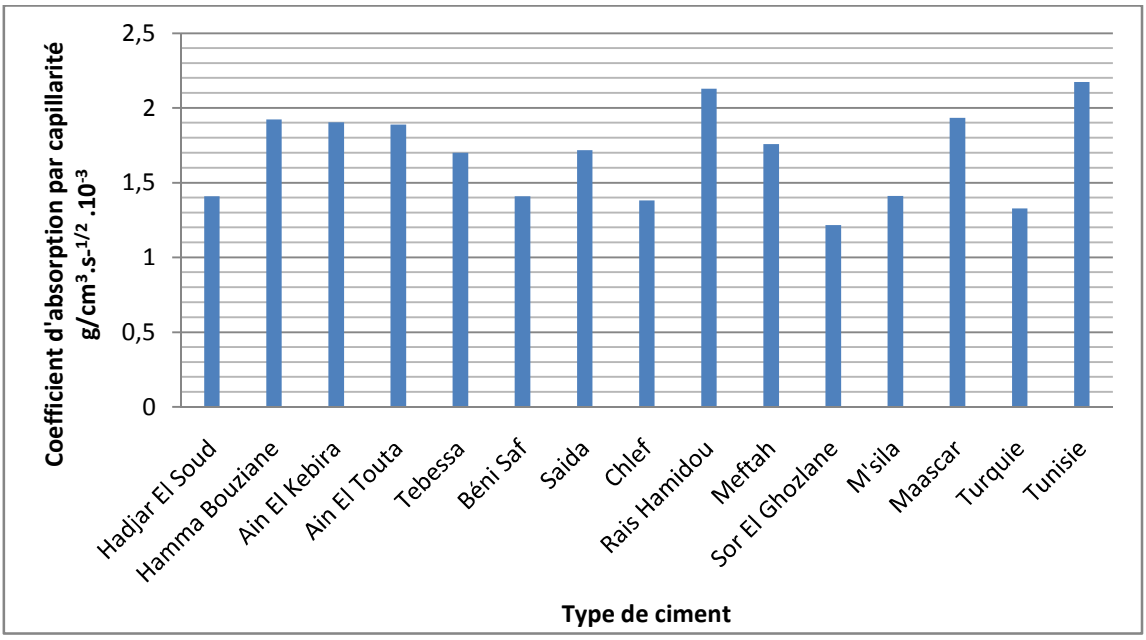


Fig. III.16: Absorption capillaire des éprouvettes des différents ciments utilisés.

III.10 Influence du ciment sur l'ouvrabilité du béton

Les résultats des essais de l'ouvrabilité sont donnés par figure III.17.

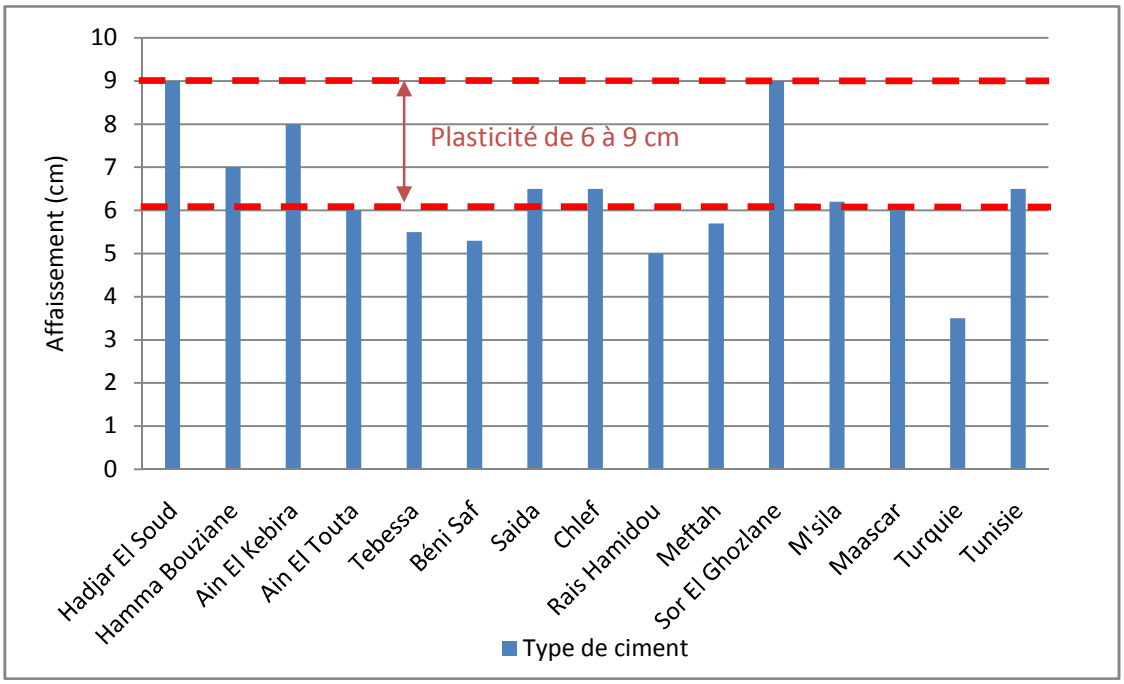


Fig. III.17: Ouvrabilité des bétons des différents ciments utilisés

Pour un rapport fixe d'E/C de 0.63, les mélanges des bétons confectionnés ont donné des bétons plastiques pour une valeur comprise entre 60 à 90 mm avec une tolérance de mesure d'affaissement de 20 mm à l'exception du ciment importé de la Turquie qui a donné une ouvrabilité de 35 mm. Ceci est du à l'ajout de quartz au ciment utilisé et à sa grande finesse (5208 cm^2/g). Skendar. [91] a aussi trouvé que les bétons confectionnés avec des ciments de surface spécifique de Blaine élevée donnent des valeurs d'affaissement plus faibles. Ces résultats montrent l'importance de la modification de la composition du béton (ajout de plastifiant ou variation du rapport E/C) lorsque la source du ciment varie sur site. La présence du laitier (Hadjr Soud et Ain Kebira) semble améliorer l'ouvrabilité du béton contrairement à l'ajout calcaire (Meftah et Rais Hamidou) et la pouzzolane naturelle (Béni Saf).

III.11 Influence du ciment sur la résistance à la compression du béton

La résistance à la compression du béton est présenté dans la figure III.18 et le tableau III.7. Les résultats sont la moyenne de trois (03) mesures. Quatre bétons ont donnés des résistances à la compression supérieure à celle visée par le calcul théorique (30 MPa).

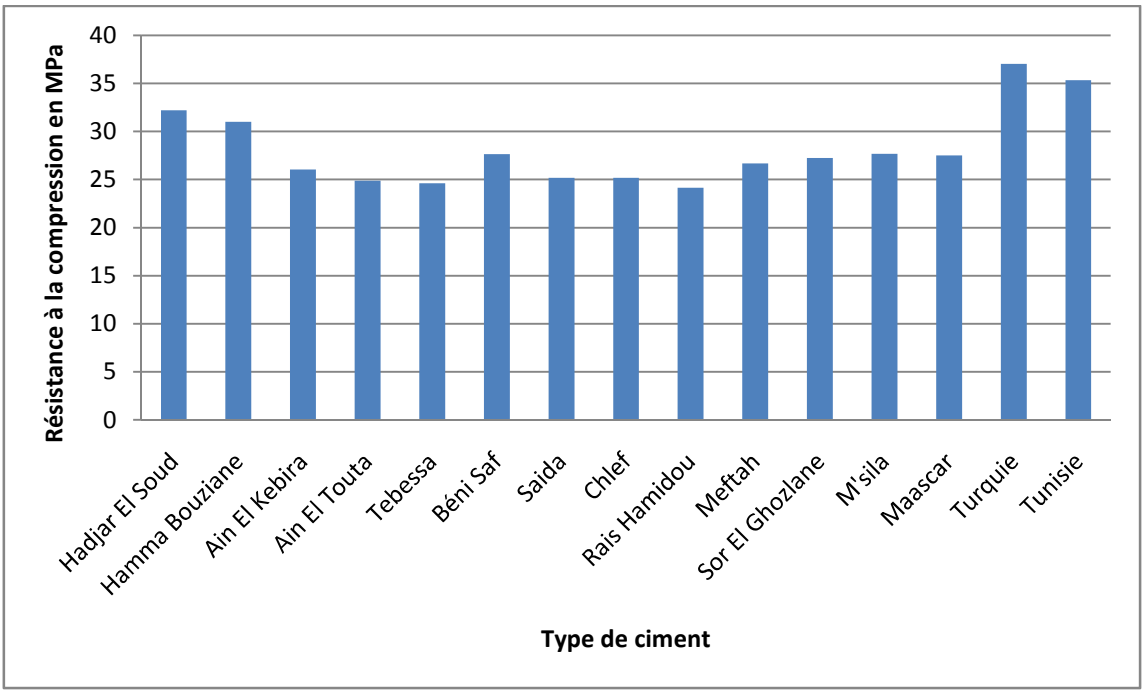


Fig. III.18: Résistance à la compression du béton à 28 jours des différents ciments utilisés.

La résistance à la compression à 28 jours a varié de 24 MPa à 37 MPa. La différence entre la plus grande valeur (ciment de Turquie) et la plus petite valeur (ciment de Rais Hamidou) est de 54% montrant ainsi l'importance du choix de ciment et la prise en compte de sa finesse et de sa composition chimique.

Tableau III.7 : Résistance à la compression du béton 15*15*15 des ciments utilisés.

Type de ciment	Résistance à 28 jours à la compression des éprouvettes en Béton	
	Rcmoy (MPa)	σ
Hadjar El Soud	32,20	1,46
Hamma Bouziane	31,02	0,64
Ain El Kebira	26,03	1,06
Ain El Touta	24,86	1,10
Tebessa	24,61	2,41
Béni Saf	27,64	1,37
Saida	25,17	1,66
Chlef	25,17	2,95
Rais Hamidou	24,14	0,60
Meftah	26,68	1,76
Sor El Ghozlane	27,24	0,64
M'sila	27,67	1,49
Maascar	27,52	0,85
Turquie	37,04	1,38
Tunisie	35,35	1,04

III.12 Résistance à la flexion du béton

La figure III.19 et la tableau III.8 résument les résistance de la flexion du béton à 28 jours pour tous les ciments testés. On remarque que la résistance à la flexion varie de 2.15 MPa à 3.55 MPa. Le rapport Rcompression/Rflexion varie de 10 à 12.

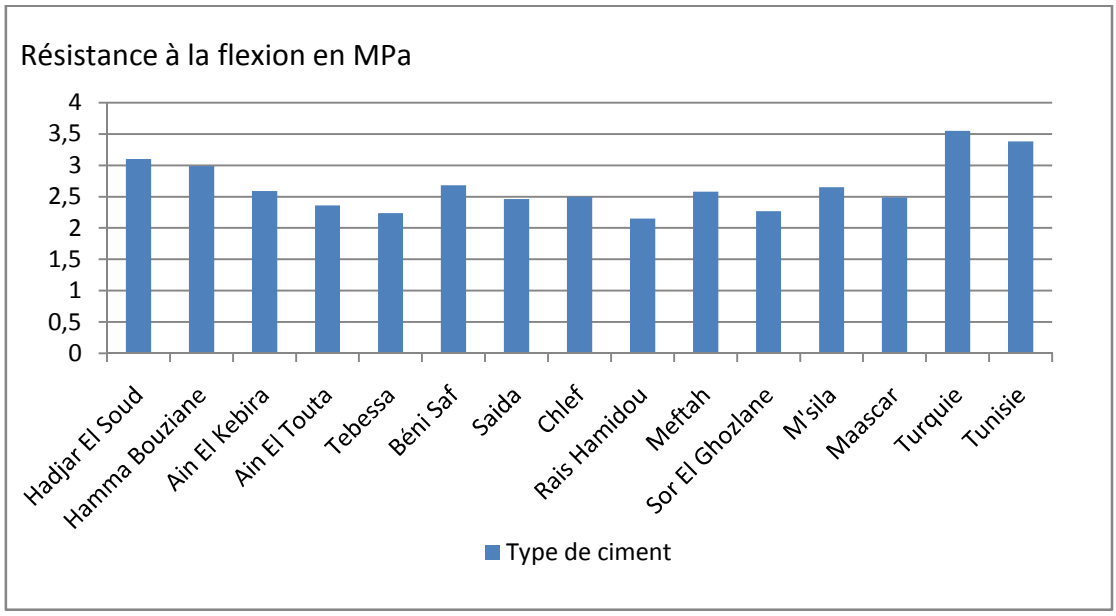


Fig. III.19: Résistance à la flexion en fonction des différents ciments utilisés.

Tableau III.8 : Résistance à la Flexion du béton

Type de ciment	Résistance à 28 jours à la flexion des éprouvettes en Béton (Mpa) Rfmoy	σ
Hadjar El Soud	3,1	1,56
Hamma Bouziane	2,99	0,74
Ain El Kebira	2,59	1,16
Ain El Touta	2,36	1,16
Tebessa	2,24	1,41
Béni Saf	2,68	1,39
Saida	2,46	1,88
Chlef	2,50	2,09
Rais Hamidou	2,15	0,70
Meftah	2,58	1,90
Sor El Ghozlane	2,27	0,55
M'sila	2,65	1,05
Maascar	2,49	1,65
Turquie	3,55	1,28
Tunisie	3,38	1,34

III.13 Masse volumique et porosité du béton

La masse volumique du béton varie de 2400 kg/m3 à 2450 kg/m3 (Fig. III.20). La variation est très faible (environ 2%). La porosité du béton (Fig. III.21) est relativement comparable pour tous les ciments testés (6% à 8%).

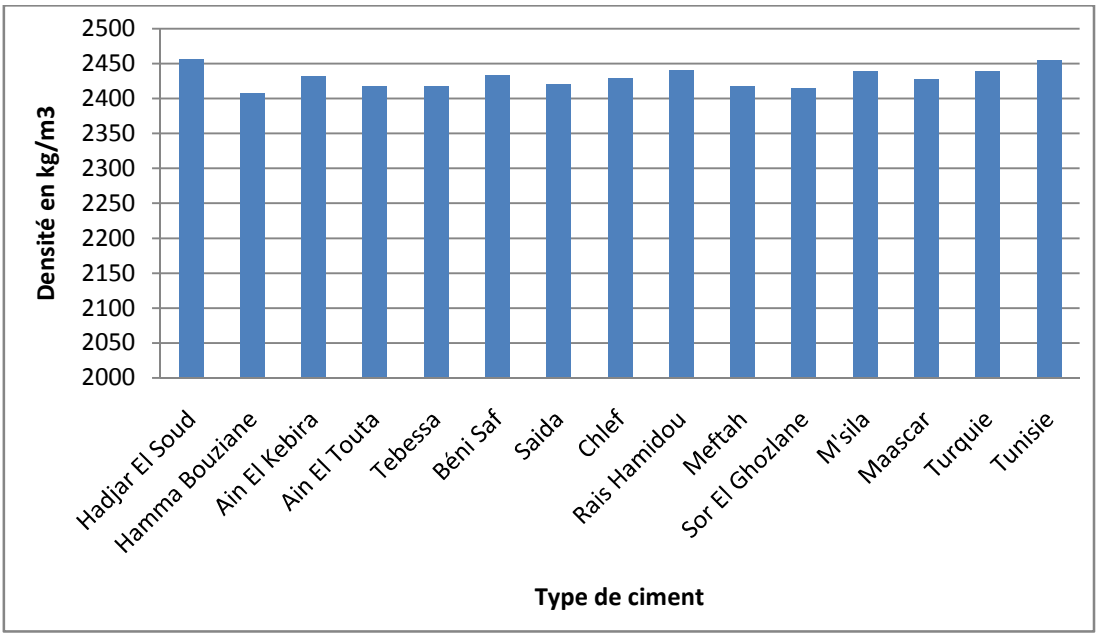


Fig. III.20: Densités du béton des différents ciments.

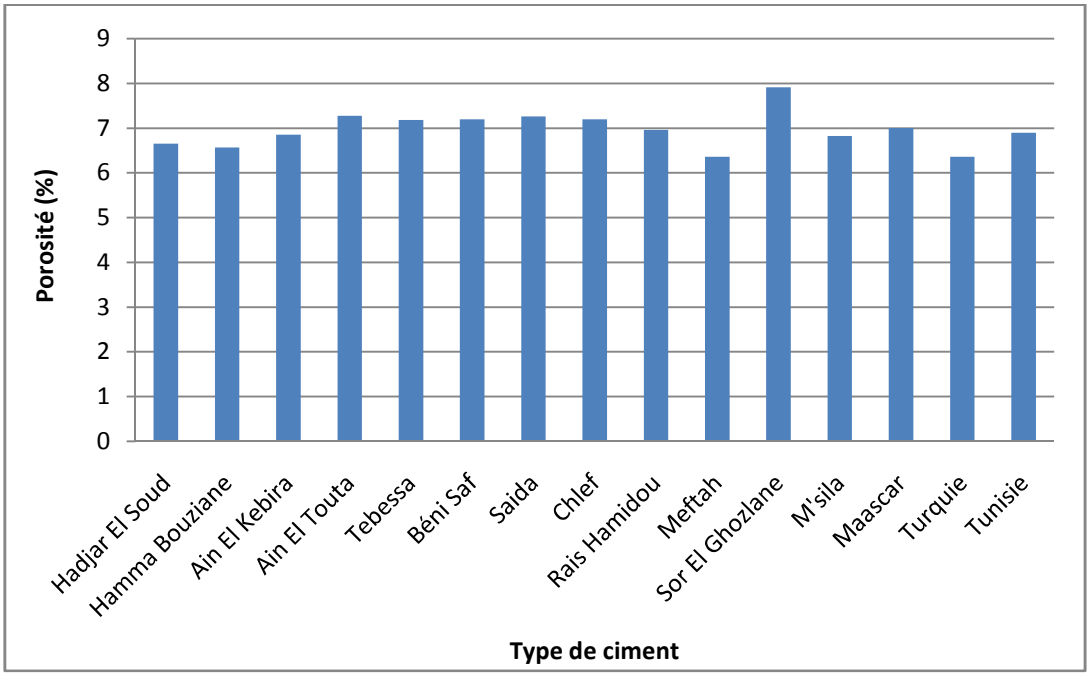


Fig. III.21: Porosités du béton en fonction des différents ciments.

III.14 Influence du ciment sur l'absorption capillaire du béton

Les résultats des essais de sportivité appliqués sur des échantillons en béton sont présentés dans les figures III.22.a et III.22.b.

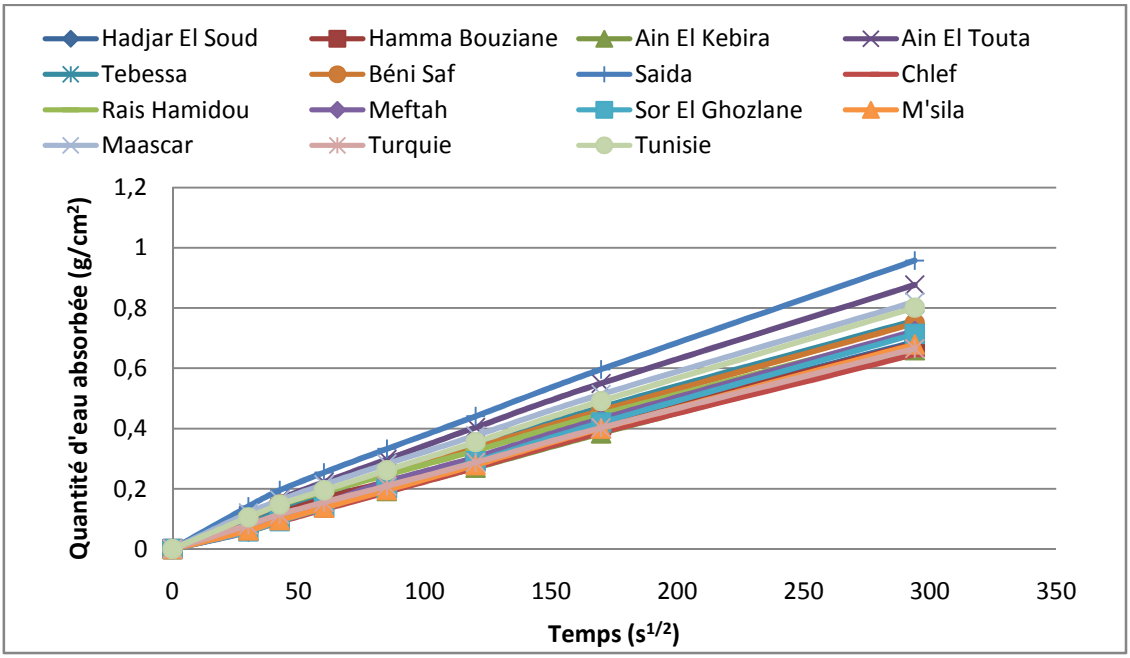


Fig. III.22.a : Evolution de la sorptivité du Béton en fonction du temps jusqu'à 2 heures

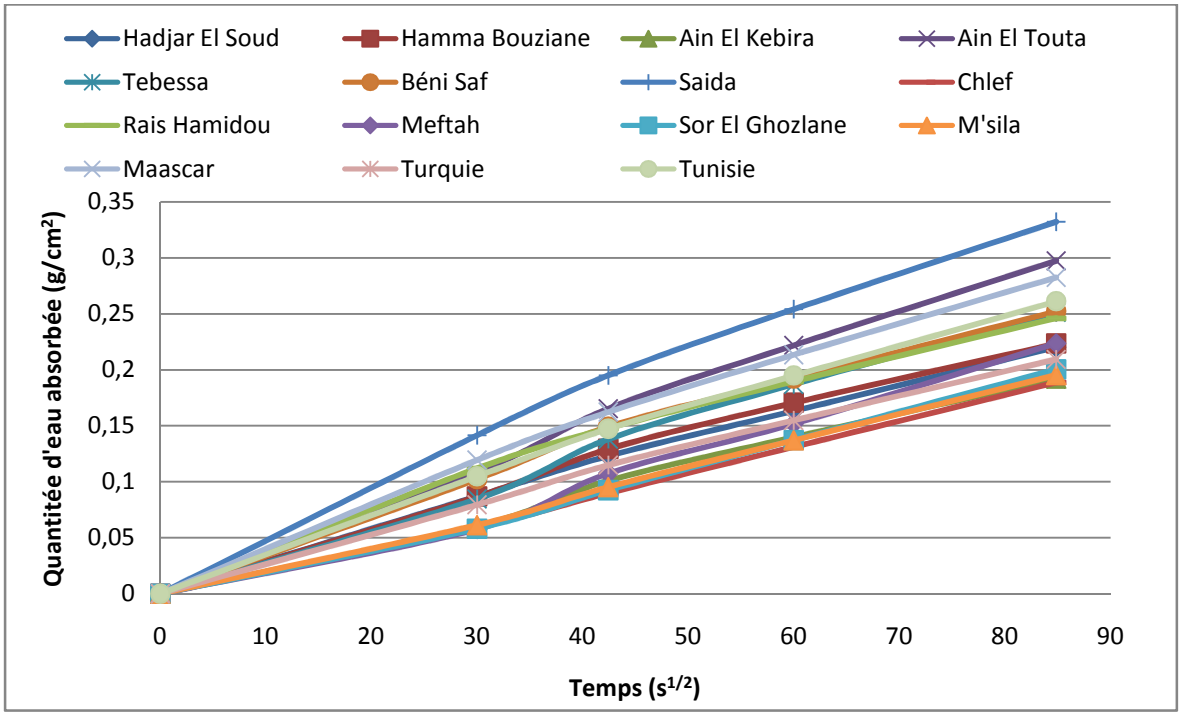


Fig. III.22.b : Evolution de la sorptivité du Béton en fonction du temps jusqu'à 24 heures

Le tableau III.9 présente le coefficient d'absorption capillaire. L'absorption capillaire est influencée par le ciment utilisé en raison de la variation des finesses et l'ajout utilisé dans les différents ciments. Par conséquent, pour une même composition, la durabilité du béton est influencée par le choix du ciment à utiliser.

Tableau III.9: Coefficient d'absorption du béton.

Type de Ciment	Coefficient d'Absorption d'eau par capillarité ($g/cm^3.s^{-1/2}$).10^{-3}
Hadjar El Soud	2,304
Hamma Bouziane	2,277
Ain El Kebira	2,248
Ain El Touta	2,95
Tebessa	2,563
Béni Saf	2,487
Saida	3,169
Chlef	2,225
Rais Hamidou	2,369
Meftah	2,489
Sor El Ghozlane	2,468
M'sila	2,331
Maascar	2,727
Turquie	2,240
Tunisie	2,682

.

III.15 Résistance des mortiers normalisés aux sulfates

III.15.1 Perte en masse

✓ **Sulfate de sodium (Na_2SO_4)**

Les résultats de la variation relative de la masse en fonction de la période d'immersion dans les solutions 5% de Na_2SO_4 des différents mortiers avec différents ciments de ciment sont montrés sur la figure III.23. Selon cette figure, on remarque une augmentation de masse des éprouvettes de mortiers avec les périodes d'immersion pour l'ensemble des ciments étudiés. Cette augmentation varie selon le ciment. Le classement de la vulnérabilité à l'attaque des sulfates dans la solution 5% Na_2SO_4 vis-à-vis les mortiers est différent pour certains ciments. Jusqu'à 14 semaines, les variations des masses pour tous les ciments sont les même. Cependant, on constate que après 22 semaines de la période d'immersion, La vulnérabilité de l'attaque par les sulfates de sodium vis a vis du mortier a enregistré une grande valeur de la variation de la masse (5.41%) pour le ciment

de Hama Bouziane, cet effet est due la présence de la valeur maximal du C_3A, la valeur minimal du C_4AF, la nature et le pourcentage de l'ajout du tuf utilisé d'origine pouzzolanique. Le ciment de Chlef d'ajout de calcaire est classé en deuxième position (2.09%) en matière de vulnérabilité à l'attaque par les sulfates de sodium, ce ciment présente une teneur de 11% de C_3A et 8% de C_4AF avec 12% d'ajout calcaire. Le ciment de Saida d'ajouts calcaires est classés en troisième position (1.85%) par les mêmes teneurs en C_3A et C_4AF avec 17% en ajout de calcaire. Les autres ciments ont presque les mêmes augmentations de la masse en notant que les ciments au laitier de haut fourneau et/ou faible teneur en C3A ont donnée des faibles variations à 22 semaines d'immersion.

Le sulfate de sodium attaque le $Ca(OH)_2$:

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4.10H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH + 8H_2O \qquad (III.1)$$

La réaction avec l'aluminate de calcium hydraté peut être formulée de façon suivante :

$$2(3CaO.Al_2O_3.12H_2O) + 3(Na_2SO_4.10H_2O)$$

$$\longrightarrow \quad 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O + 2Al(OH)_3 + 6NaOH + 17H_2O \qquad (III.2)$$

Le sulfate de calcium n'attaque que l'aluminate de calcium hydraté pour former un sulfoaluminate de calcium (l'ettringite : $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$).

✓ **Sulfate de sodium ($MgSO_4$)**

Les résultats de la variation relative de la masse en fonction de la période d'immersion dans les solutions 5% de $MgSO_4$ des différents mortiers avec différents ciments sont montrés sur la figure III.24. Selon cette figure, on remarque une augmentation de masse des éprouvettes de mortiers avec les périodes d'immersion pour l'ensemble des ciments étudiés. Dans la solution de $MgSO_4$, le ciment de Hama Bouziane (1.83%), le ciment d'Ain El Kebira (1.83%) et le ciment de la Turquie (1.80%) ont subi presque la même variation de la masse. Ensuite le ciment de Tébessa (1.73%), Meftah et Ain Touta (1.69%), Le ciment de Hadjar El Soud , Chlef (1.59%) , le ciment de Maascar (1.58%) , le ciment de Saida (1.48%) , le ciment de Sour El Ghozlane (1.37%) , le ciment de Béni Saf (1.25%) , Tunisie (1.23%) ainsi que Msila et Rais Hamidou.

le sulfate de magnésium attaque les hydrates de silicate de calcium aussi bien que le $Ca(OH)_2$ et l'hydrate d'alluminate de calcium. LA réaction est du type :

$$3CaO.2SiO_2.aq + MgSO_4.7H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2 + SiO_2.aq \qquad (III.3)$$

La conséquence finale de l'attaque au sulfate de magnésium est la destruction [10].

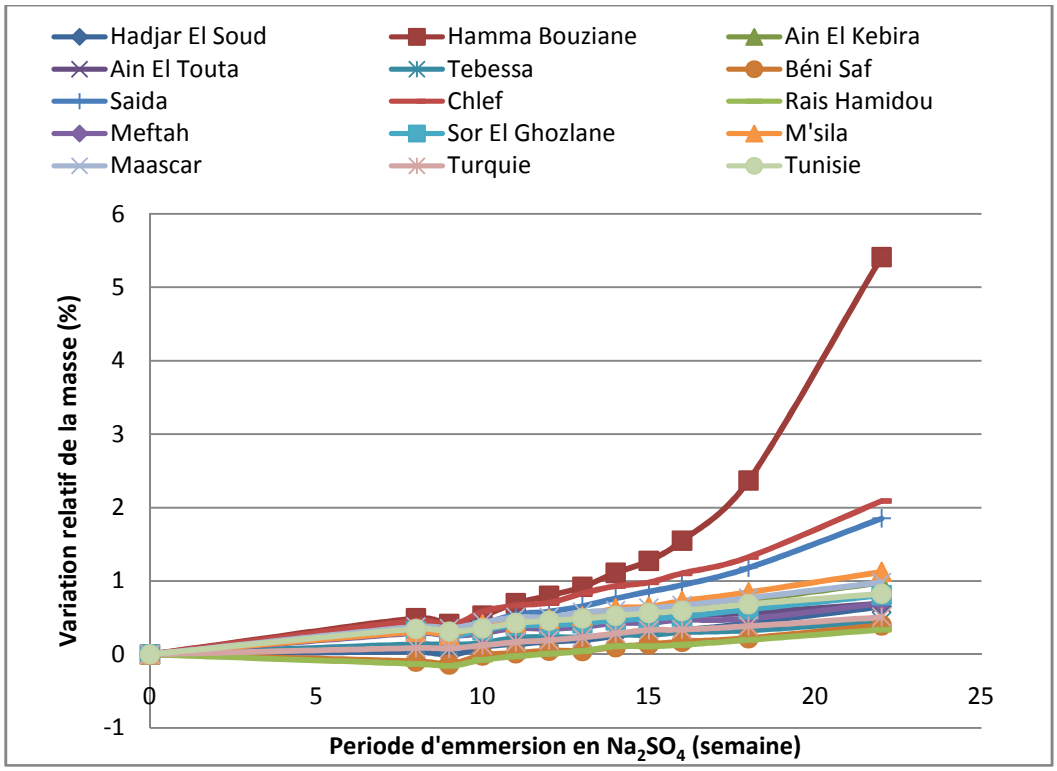


Fig. III.23 : Evolution de la masse des mortiers en fonction de la période d'émersion en Na_2SO_4.

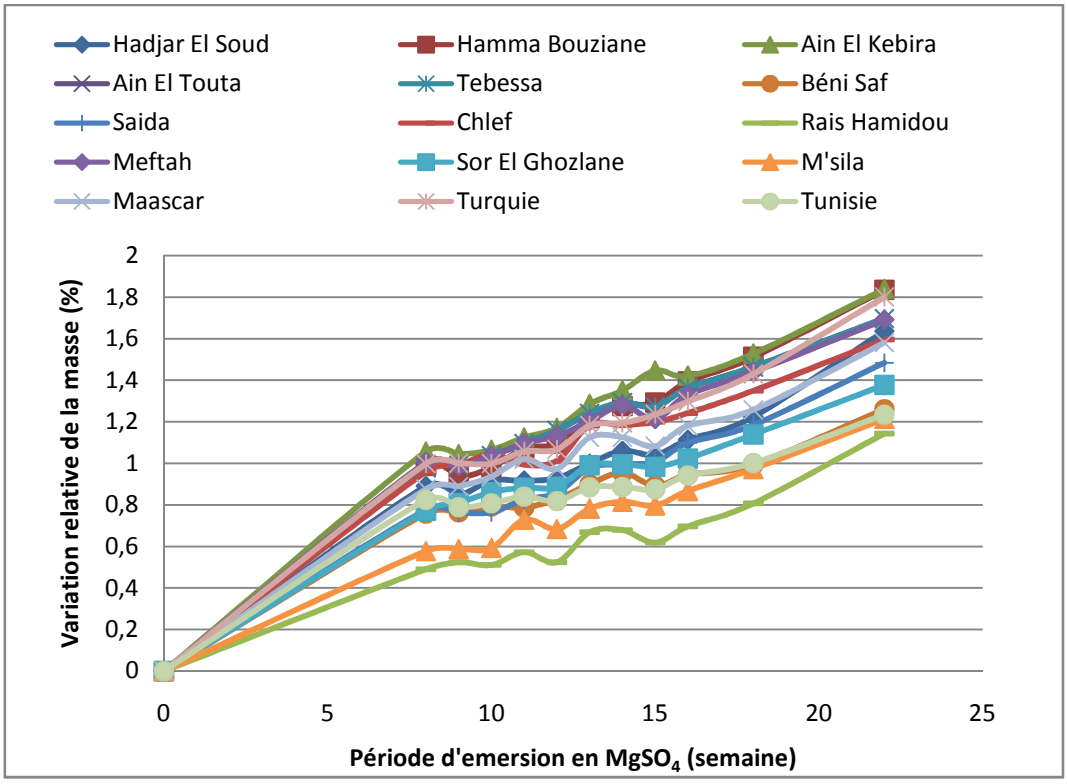


Fig. III.24 : Evolution de la masse des mortiers en fonction de la période d'émersion en $MgSO_4$.

III.15.2 Expansion

Les résultats de l'essai d'expansion des éprouvettes immergées dans les solutions contenants 5% de sulfate de magnésium ($MgSO_4$), 5% de sulfates de sodium (Na_2SO_4) sont présentés dans les deux figures citées ci-dessous. Les fait ressortir que le CEM II/A 42.5 de Chlef a subi le maximum d'expansion dans la solution du Na_2SO_4 par rapport à l'ensemble des éprouvettes confectionnées par différents types de ciments étudiés pour une valeur de 0.787%. La deuxième position est occupée par le CEM II/A 42.5 de Hama Bouziane (0.408%), ensuite le CEM II/B 42.5 de Saida (0.166%). La quatrième place est réservée au CEM II/A 42.5 d'Ain El Kebira pour une valeur de 0.062%. Les autres éprouvettes de mortier confectionnées par le reste des ciments utilisés ont des valeurs inferieures à 0.04%. La plus faible expansion est enregistrée par le CEM II/A 42.5 importé de la Turquie avec une valeur presque nulle de l'ordre de 0.005%. L'expansion des éprouvettes immergées dans la solution de 5% de Na_2SO_4 représente 8 fois pour les éprouvettes émergées dans la solution de 5% de $MgSO_4$ pour les deux type de ciments le CEM II/A 42.5 de Chlef et Saida, 3 fois pour le CEM II/A 42.5 de Hama Bouziane et le CEM II/B 42.5 de Msila, 2 fois pour le CEM II/A 42.5 de Hadar El Soud, Ain El Kebira, Ain Touta, Tébessa. L'expansion est le même pour le reste des éprouvettes à l'exception du CEM II/A 42.5 importé de la Turquie.

III.15.3 Aspect visuel

L'état des éprouvettes des mortiers après 22 semaines d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4 sont présentés sur les figures III.27, III.28 et III.29. Nous avons constaté la courbure de l'éprouvette du mortier fabriqué par le CEM II/A 42.5 de Hama Bouziane et la fissuration longitudinale des éprouvettes confectionnées par le CEM II/A 42.5 de Chlef au niveau des extrémités des éprouvettes. Pour les éprouvettes immergés dans la solution de 5% de $MgSO_4$, nous constatons la formation d'une couche blanchâtre sur l'ensemble des éprouvettes avec la dégradation au niveau des coins et arrêtes des éprouvettes des mortiers confectionnée par les CEM II/A 42.5 de Ain Touta, Skikda, importé de la Tunisie, , Sour El Ghozlane, Chlef, importé de la tuquie et le CEM II/B 42.5 de Masscar.

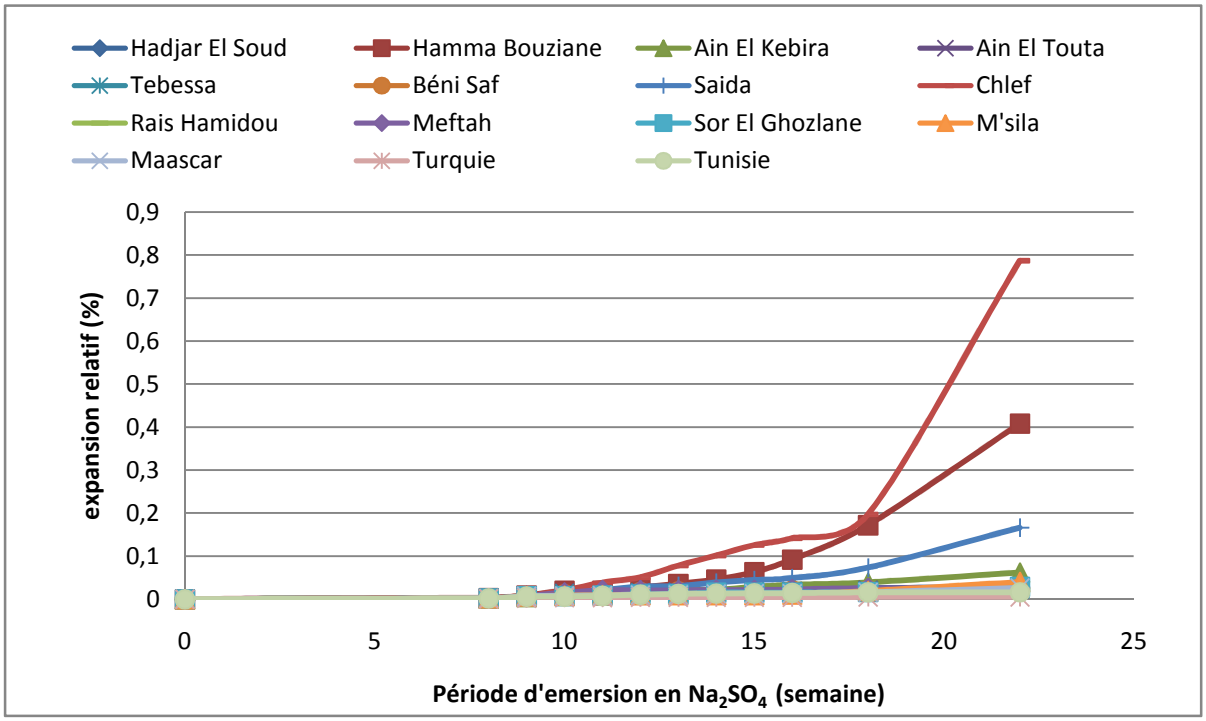


Fig. III.25: Evolution de l'expansion des éprouvettes en mortier en fonction de la période d'immersion en 5%Na_2SO_4

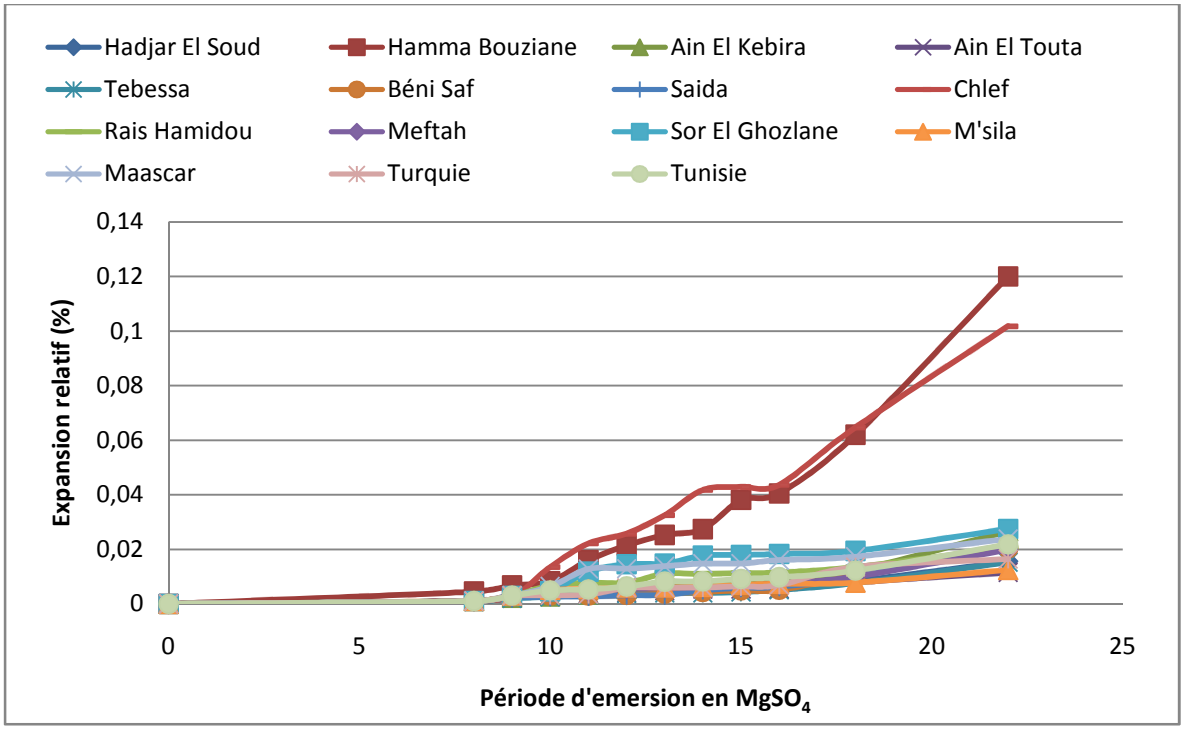


Fig. III.26: Evolution de l'expansion des éprouvettes en mortier en fonction de la période d'immersion en 5%$MgSO_4$



Fig. III.27 : Eprouvettes en mortier des types de ciment utilisés après l'immersion dans une solution de 5% Na_2SO_4

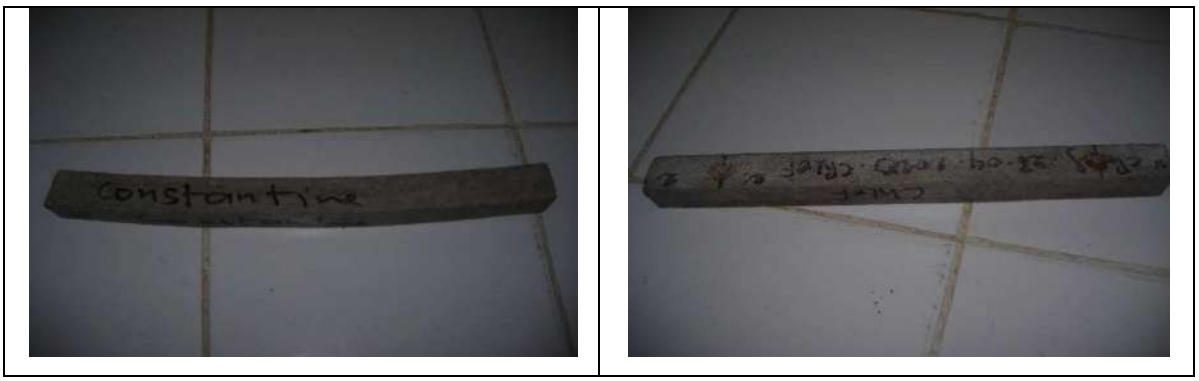


Fig. III.28 : Eprouvettes en mortier de ciment de Hama Bouziane et Chlef immergées en dans une solution de 5%Na_2SO_4



Fig. III.29: Eprouvettes en mortier normalisé émergées en $MgSO_4$

Conclusions générales et recommandations

CONCLUSION GENERALE

En Algérie, il existe plus 13 cimenteries produisant différents types et classes de ciment. Le changement de la source d'approvisionnement du ciment sur site est courant. Par conséquent, il est indispensable de connaître les propriétés des ciments disponibles sur le marché Algérien.

Dans notre travail, une étude expérimentale a été élaborée pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des ciments des 13 cimenteries algériennes et 02 étrangères ainsi que leurs performances vis-à-vis de l'attaque des sulfates de sodium et de magnésium. L'effet de variation de la source du ciment sur la performance du béton a aussi été analysé.

Les résultats de cette étude ont donné les conclusions suivantes :

- La composition minéralogique des ciments composés étudiés est conforme aux normes en vigueur. Le C_3S varie de 53 à 59%, le C_2S varie de 16 à 25%, le C_3A de 4 à 12%, le C_4AF de 6 à 14%.
- Le CaO libre dans l'ensemble des ciments composés reste toujours inférieurs à 2% pour éviter le problème de gonflement qui conduit vers l'éclatement du béton. La teneur du régulateur de prise (gypse) dans ces ciments reste inferieur à 5% à l'exception de celle Tébessa et Béni Saf qui sont de 6%.
- Les ajouts utilisés dans la fabrication de ces ciments localement sont le laitier de haut fourneau, le tuf, le calcaire, et la pouzzolane naturelle, le taux de substitution en ajout varie de 10% à 21%.
- La finesse (surface spécifique de Blaine) pour l'ensemble des ciments étudiés varie entre 3135 à 5208 cm^2/g.
- La masse volumique absolue de l'ensemble des ciments étudiés reste comprise entre 2.868 à 3.108 g/cm^3. La masse volumique apparente varie de 957 kg/m^3 à 1177 kg/m^3.
- La consistance de ces ciments sur une pâte (aiguille de Vicat) est comprise entre 23.4 et 26.4% à l'exception de celle de la Turque qui est de 35% et ce en raison de sa finesse très élevée.

- Le début de prise varie de 2 heures à 4 heures et 25 minutes néanmoins il reste conforme à la norme qui exige le temps minimum de début de prise 60 minutes pour les classes 42.5 et 90 minutes pour les classes 90 minutes. Le temps de fin de prise est de 2 heures et 50 minutes à 5 heures et 30 minutes.
- L'expansion à chaud varie de 0 à 2 mm, et par conséquent reste conforme à la norme qui exige un maximum de 10 mm.
- Le maniabilimètre de mortier donne des temps d'écoulement de 2.9 à 26.7 secondes. Les ciments présentant les temps élevés nécessitent le recours à l'utilisation de superplastifiant lors de la fabrication du béton.
- La résistance à la compression sur mortier varie de 13.67 à 31.17 MPa à 2 jours, de 28.55 à 43.34 MPa à 7 jours, de 40.12 à 54.29 MPa à 28 jours, de 43.12 à 64.04 MPa pour 90 jours et de 45.32 à 67.68 MPa pour 180 jours. Deux ciments n'ont pas été conformes au minimum exigée de résistance à 28 jours de 42.5 MPa. La résistance à jeune âge et à long terme varient selon la finesse du ciment, de sa composition chimique et en type d'ajout utilisé.
- La résistance à la flexion mortier est varie de 2.36 à 4.87 MPa à 2 jours, de 2.45 à 5.12 MPa à 7 jours, de 2.71 à 5.35 MPa à 28 jours, de 3.40 à 5.36 MPa pour 90 jours et de 4.29 à 6.75 MPa pour 180 jours.
- Le retrait des éprouvettes en mortier varie de 595.84 à 872.77 µm/m à 28 jours et de 811.61 à 1064.99 µm/m à 180 jours et par conséquent , il est conforme à la norme qui exige un maximum 800 µm/m pour la classe 32.5 et 1000 µm/m pour la classe 42.5 à 28 jours.
- L'absorption capillaire à 28 jours des mortiers normalisés varie de 1.216. 10^{-3} à 2.174. $1^{0\text{-}3}cm.s^{-1/2}$.
- L'ouvrabilité du béton varie de 3.5 à 9 cm, d'où le recours au superplastifiant est nécessaire pour avoir béton plastique pour les ciments de finesses élevées.
- La résistance à la compression du béton à 28 jours varie entre 24.14 et 37.04 MPa (soit 53%°) confirmant ainsi la nécessité de modifier la composition du béton lorsqu'une source de ciment est modifiée.
- La densité du béton varie peu avec le type de ciment. Elle est de 2408.17 à 2455.58 kg/m^3.

- La résistance à la flexion du béton à 28 jours varie de 1.49 à 8.38 MPa. Soit un rapport R_c/R_f = 10 à 12.
- L'absorption capillaire à 28 jours du béton varie de $2.225.10^{-3}$ à $3.169.10^{-3} cm.s^{-1/2}$ et par conséquent la durabilité du béton et sa résistance aux eaux agressives varie selon le type de ciment utilisé.
- L'expansion du mortier immergé dans une solution Na_2S_{O4} pendant 22 semaines est varie de 0.005% à 0.062% à l'exception de trois ciments qui ont donné des expansions élevées de 0.166 à 0.78% en raison de leur C_3A élevé (11 à 12%).
- L'expansion du mortier immergé dans une solution $MgSO_4$ pendant 22semaines varie de 0.011% à 0.027% à l'exception de deux ciments qui ont donné des expansions très élevés de 0.102% à 0.120% en raison de leur C_3A et C_3S élevé.

RECOMMANDATIONS

Nous recommandons pour des futurs travaux l'étude :

- La performance (mécanique et durabilité) de ces ciments à très long terme (>360 jours).
- La performance du ciment de la même source sur des échantillons prélevés sur une période de 12 à 24 mois.
- La performance de différentes compositions de béton (B25, B30, B40 et BAP) fabriqués par différents ciments.

Références bibliographiques

[1] Dreux. G, Festa. J : " Nouveau guide du béton et de ses constituants ", 8ème édition, Eyrolles, France, 1998.

[2] Folliot, A. : " Le ciment" in « Le Béton hydraulique connaissance et pratique », sous la direction de Baron. J, Sauterey. R, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1982.

[3] Pliskin. L : " La fabrication du ciment - ciment français – ", Ed. Eyrolles, France, 1993.

[4] Cheriat. Y, Nafa. Z : " Eléments de matériaux de construction et essais ", Direction de la Publication Universitaire de Guelma, Algérie, 2006.

[5] Vénuat. M : " La pratique des ciments et des bétons " Ed. Moniteur, France, 1976.

[6] Dowell. Schlumberger : " Cementing Technologie ", Nova communications Ltd. London, 1984.

[7] Gani, M.S.J.: " Cement and concrete ", First Edition, Chapman & Hall, London, 1997.

[8] Kedjour. N : " Le laboratoire du Béton ", Office de Publication Universitaire, Alger, 2005.

[9] Berton, Y.et Le Berre, P. : " Guide de prospection des matériaux de carrière ", Office de Publication Universitaire, Alger, Ed. BRGM, France, 1990.

[10] Neville, A.M. : " Propriétés des bétons ", Ed. Eyrolles, France, 2000.

[11] Brahma, A. : " Le béton " Office de Publication Universitaire", Alger, 1996.

[12] Komar , A.: " Matériaux et éléments de construction ", Ed. Mir, Moscou, 1978.

[13] Institut d'Etudes Technologiques Prospectives Unité de Production et Consommation Durable, Bureau Européen IPPC : " Prévention et contrôle intégrés de la pollution, Document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans les industries de fabrication du ciment, de la chaux et de la magnésie ", Séville – Espagne, Mai 2009.

[14] Rens, L. : " La route en béton : un choix réfléchi et durable ", Fédération de l'Industrie de Cimenterie Belge, FEBELCEM, Bruxelles, 2009. (www.febelcem.be)

[15] ENV 206: "Concrete-performance, production, placing and compliance criteria ", 1989.

[16] Nguyen T.S. : "Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires", Thèse de Doctorat, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) ; INSA-UPS Génie Civil, Lyon, 2006.

[17] ASTM 1240-00: " Standard specification for use of silica fume as a mineral admixture in hydraulic-cement concrete, mortar, and grout ".ASTM, 2000.

[18] SCMs Supplementary Cementing Materials " Rationale ". www.cours-genie civil.com

[19] ASTM C 618-94: " Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete " ASTM Standards, 1994.

[20] Kenai. S.: " Le ciment, fabrication, propriétés et contrôle de qualité " document interne, Université de Blida.

[21] NF EN 197 – 1 : " Ciment, Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, ", Février 2001.

[22] Gané, R.: " Cours de durabilité et réparation des Bétons (GCI-714) " Chapitre 2 : la durabilité des bétons. Université de Sherbrooke, Canada, 2002, www.usherb.ca.

[23] Baron, J., et Santerey, R. : " Béton hydraulique connaissance et pratique", presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, Ed. Eyrolles, Paris, 1982.

[24] NA 442 : " Ciment : définition, classification et spécification", Alger, 2000.

[25] Asroun. A., Bouiadjra. M.B., Trouzine. H.: " Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des bétons " XXIII Rencontres Universitaires de Génie civil 2005 – Risques et Environnements, Sidi Bel-abbès, Algérie, 2000.

[26] El hadj. M.: " Performance des ciments à base de la pouzzolane naturelle de Béni Saf " Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, Octobre 2002.

[27] NF 15 – 301 : " Liants hydrauliques – Ciments courants – Composition, spécifications et critères de conformité ", Juin 1994.

[28] Habbouche. A.: " Propriété mécanique et durabilité du béton à base de sable de concassage " Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, Juin 2002.

[29] Livesey. P.: " Strength characteristics of portland limestone cements" Construction and Building Materials, Vol.5 September 1991, pp. 147-150.

[30] CARE. S.: " Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des Béton, plan d'expérience et analyse statistique " Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, France, Février, 2000.

[31] Hadj Sadouk. A.: " Durabilité des mortiers à base de ciment au calcaire " Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, Juin 2004.

[32] Adams. L.D. and Rice R.M.: " Effect of limestone additions upon drying shrinkage of portland cement mortar, Carbonate Additions to cement, ASTM STP 1064 P. Klieger and R.D. Hooton, Eds., American Society for testing and materials, Philadelphia, 1990.

[33] Benia.M.: " Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux " Mémoire de magister, Département de Génie Civil, Université de M'sila, Algérie, 1998.

[34] E.R.E.G.: " Propriétés d'un CPG avec ajout tuf " Boumerdès, Algérie, Septembre 1987.

[35] M.L.Wong and V.Ramakrichran: " Evolution of blended cement mortar and concrete move from types 3 cement and Kilorchit – construction and building materials ", Vol 2 Jan. 1990, pp 78 85.

[36] Benyahia et Aidani: " Contribution à l'étude de quelques additifs actifs dans la fabrication du ciment portland " Mémoire de fin d'études, Institut de chimie industrielle, Université de Blida, Algérie, 1992.

[37] M. Abib, Gaher. H., Kharchi. F. : " l'influence du métakaolin sur les propriétés du béton " Alger, 2006.

[38] Ghemani. A. et Doukani. S. : " Elaboration d'un ciment composé de l'ajout de vase calcinée du barrage " Mémoire de Fin d'étude, Département de Génie des Matériaux, Université de Boumerdès, Algérie, 2008.

[39] " Cours en ligne matériaux de construction chapitre 2 les ciments " AUF www.refer.org

[40] Lafarge Meeting prescripteurs et clients: " Lancement de la nouvelle gamme de produits Lafarge Ciment Algérie", Journée d'études, Département de Génie Civil, Médéa. Novembre 2010.

[41] Lakab, O. et Haoua, M. " Effet de la variation de la composition du ciment sur la qualité du mortier et béton" Mémoire de fin d'étude, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, 1997.

[42] Regoud.M.: " L'hydratation du ciment" in « Le béton hydraulique », sous la direction de Baron. J, Sauterey. R, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1982.

[43] Strak.J. et Bollman. K. : " Delayed ettringite formation ", Nordic Concrete Research, Vol 23, N°2 , 2000.

[44] Escalent Garcia.G.I. et Sharp.J.H. : " Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cement : part II , blended cements ", cement and Concrete Research, Vol 28, 1998, pp.1259-1274.

[45] Shi.C.et Day.R.L.: " Pozzolanic reaction in the presence of chemical activator . part II. Reaction products and mechanism ", Cement and Concrete Research, Vol 30, 2000, pp.607-613.

[46] Yves Freddy Houst: " Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie ", Thèse de Docteur es sciences, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne , Suisse , 1992.

[47] Maltais, Y. : " Étude de l'évolution du degré d'hydratation de ciments et du développement des résistances mécaniques de mortiers et de bétons soumis à différentes températures de mûrissement ", Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 1996.

[48] Baron (J.), Olivier (J.P.): " La durabilité des bétons " Presses de l'ENPC, Paris, 1992.

[49] Meeks, K.W. and Carino, N.J.: " Curing of high- performance concrete: Report of the state of the art " Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899, March 1999.

[50] Martys, N.S.: " Survey of concrete transport properties and their measurement " National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5592, Feb.1995.

[51] Martys, N.S. and C.F. Ferraris: " Capillary transport in mortars and concrete " Cement and Concrete Research, Vol. 27, N°5 , pp. 747-760, 1997.

[52] Tsivilis, S. et Al.: " The perméability of Portland limestone cement concrete ", Cement and Concrete Research, 2003.

[53] Tasdemir, C.: " Combined effect of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete ", Cement and Concrete Research, 2003.

[54] Khatib, J. and R.M. Clay: " Absorption characteristics of metakaolin concrete ", Cement and Concrete Research , 1995.

[55] Biricik, H. et Al.: " Resistance to magnesium and sodium sulfate attack of mortars containing Wheat straw ash ", Cement and Concrete Research , Vol. 30 , 2000, pp. 1189–1197.

[56] Mangat, P.S. and Khatib, J.: " Influence of Fly Ash , silica fume and slag on sulfate resistance of concrete ", ACI Materials Journal, Vol. 92 , N°. 5, September/October, 1995, pp. 587 – 594.

[57] O'Farrell, M. et Al.: " Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar . Part I: Sodium sulphate solution ", Cement and Concrete Research, vol.29, 1999, pp. 1781 – 1790.

[58] Yeginobali, A. and Dilek, F.T.: " Sulfate resistance of mortars containing Silica Fume as evaluated by different methods", Proceedings, Fifth International Conference Fly ash, Silica Fume , Slag , and Natural pozzolans Concrete, Milwaukee, Wisconsin , USA, vol.2, 1995, pp. 795 – 813.

[59] Janotka, I. and KrajCi, L.: " Utilization of natural Zeolite in Portland Pozzolan cement of increased sulfate resistance " , Durability of concrete , Proceedings, Fifth International Conference Barcelona, Spain, 2000, vol.1, pp. 223 – 236.

[60] Al-Amoudi, O.S.B. et Al.: " Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements " ACI Materials Journal, vol.92, N°1, 1995, pp. 15 – 24.

[61] Rodriguez-Camacho, R.E.: " Using natural pozzolans to improve the sulfate resistance of cement mortars ", In, MALHOTRA V.M (ed), Proceeding International Conference on the use of fly ash , silica fume, slag and other mineral by-products in concrete , 6^{th} , Bangkok, 1998, Detroit: American Concrete Institute, Vol.2, pp. 1021-1039.

[62] CEN EN 196-1 : " Méthode d'essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse " AFNOR, Paris 1996.

[63] NFP 18-560 : " Analyse granulométrique par tamisage " AFNOR, Paris, 1990.

[64] NFP 18-554: " Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux" , AFNOR, Paris, 1990.

[65] NFP 18-555: " Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables" , AFNOR, Paris, 1990.

[66] NF EN 196-6 : " Méthode d'essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse " AFNOR, Paris 1996.

[67] NF P 15 – 473: " Méthode d'essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse " AFNOR, Paris 1996.

[68] CEN EN 196-3 : " Méthode d'essais des ciments – détermination du temps de prise et de la stabilité " AFNOR, Paris 1996.

[69] NF P 15- 471 : " Méthodes d'essais des ciments – détermination des résistances mécaniques" AFNOR, Paris 1990.

[70] NF P 18-452 : "Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètre", AFNOR, Paris 1988.

[71] NF P 18-437 : "Essai pour béton frais, Partie 1 : prélèvement", AFNOR, Paris 1999.

[72] NFP 15 – 451 : "Essai d'affaissement", AFNOR, Paris 1981.

[73] NF P 15- 433 : " Essai pour béton durci- partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes " AFNOR, Paris, 2001.

[74] Lanchan, R.: " Cours de laboratoire : Granulats, Bétons, sols" édition, Desforges, France, 1983.

[75] ASTM C-102: " Test Method for length change of hydraulic cement mortars exposed to sulphate solution, ASTM.

[76] NF P 15-467: "Analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X"

[77] NA235 : " Détermination de la perte au feu", IANOR, Alger, 1990.

[78] NA236 : " détermination des insolubles", IANOR, Alger, 1990.

[79] NA5038 : " détermination de la teneur en chlorures", IANOR, Alger, 1990.

[80] Barron j et Sauterey R. le béton hydraulique bulletin des laboratoires des ponts et chaussées paris.

[81] NF P 18-404 : "Essai d'étude, de convenance et de controle, confection et conservation des éprouvettes", AFNOR, Paris 1981.

[82] NF P 18- 405 : "Essai d'information, confection et conservation des éprouvettes", AFNOR, Paris 1981.

[83] NF P 18 – 406 : "Essai de compression", AFNOR, Paris 1981.

[84] Tremblay, D. : " Béton de ciment", Modulo éditeur, Mont-Royal (Québec), Canada, 1983.

[85] Kenai, S, Elkfeul, O, Ouldrabah, O: " Propriétés physiques et mécaniques d'un ciment Portland avec ajout calcaire", National symposium of civil engineering, University of Annaba, 25-27 Mai 1993.

[86] Ramachandan, V , Zhang, C.M: " Ciment with calcium carbonate addition" 8^{th} Int. Cong. On the chemistry of cement, September 1986 , Rio , Brazil,

[87] Hormain H., Marchand. J. Duhot.V. Moranville.M.: "Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement paste and mortars" Cement and Concrete Research, Vol 25 , 1995 .

[88] Hadj Sadok. A.: " Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'El Hadjar dans des milieux agressif " Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, 2010

[89] Menadi. B.: " Performance du mortier et béton à base de filler calcaire" mémoire de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, 2008.

[90] Said Mansor. M.: " Etude des proprietés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires" mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie, 2003.

[91] Skendar. Z.: " durabilité du béton à base de sable de concassage" mémoire de Magister, Ecole nationale supérieur polytechnique, Algérie, 2009.