

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: HAMIDI Nesrine

Intitulé

L'effet combiné de la substitution partielle de ciment
par un ajout et la température de cure sur les
propriétés physico-mécanique du mortier

Soutenu devant le jury composé de: 17/06/2018

Dr .BEDDAR Miloud	Université de M'sila	Président
Dr. BOUALLEG Saida	Université de M'sila	Rapporteur
Dr .CHIKOUCHE Mohamed	Université de M'sila	Examineur
Dr .SILINE Mohamed	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017 /2018



❖ *Et ma réussite ne dépend que d'Allah. Et lui je place ma confiance, et c'est vers lui que je reviens repentant* ❖

Remerciements

On remercie le bon Dieu qui nous a donné le courage et la patience pour terminer ce modeste travail.

Ainsi on tien a remercier beaucoup Mme. BOUALLEG SAIDA

Pour les efforts considérables et le soutien qu'il nous a apportés pour la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de jurer notre travail.

J'exprime toute notre gratitude et reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer ce modeste travail

On remercie également tout les enseignants du département des Génie civil.

Enfin on tien a remercie nos amis



Dédicaces

بسم الله الرحمن الرحيم

Je dédie ce travail à :

Mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenu durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissant les protègent et les gardent.

Mes frères (belkacem, abdelhalime, rabeih, abdelnour, faoizi).

Mes sœurs (hamidasihem, samira).

Tous mes amis (nabila, maroua, faiza, mariem, oumama, kaouter, salsabil).

Les enfants (yasmine, najem eddin, idris, loai, basma ihcen, rined, kosay, samir, tamim eddar, diaa)

Spécialement à mon cousin BABI said et son épouse cousine B. kaloum

Mon encadreur Mme : S. BOUALLEG.

Tous les enseignements du génie civil.

Toute la promotion 2^{ème} année master matériaux.

HAMIDI Nesrine

SOMMAIRE	
Liste des tableaux	
Liste figure	
Introduction	
CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
1ère partie : le ciment	
I-1 Introduction	3
I-2 Histoire des ciments	3
I-3 Constituants principaux du ciment et les additions	5
I-3-1 Constituants du clinker	5
I-3-1-1 Préparation de la matière première	5
I-3-1-2 Qualité du clinker	5
I-3-2 Le Sulfate de Calcium (Le gypse - CaSO ₄)	5
I-4 Principales Catégories des Ciments	6
I-5 Les Constituants anhydres du ciment (CPA)	7
I-5-1 Composition chimique	7
I-5-2 Performance des ciments	7
I-5-3 Composition minéralogique	8
I-5-3-1 Le silicate tricalcique (Alite) C ₃ S	9
I-5-3-2 Le silicate bicalcique (belite) C ₂ S	9
I-5-3-3 Les aluminates tricalciques (C ₃ A)	10
I-5-3-4 L'alumino -ferrite tétracalcique	10
I-5-3-5 La chaux libre CaO	10
I-5-4 Composition potentielle du ciment (équation de bogue)	10
I-5-5 Composition chimique des minéraux	12
I-6 Hydratation du ciment Portland	12
I-6-1 Introduction	12
I-6-2 Hydratation des composants du ciment Portland	12
I-6-2-1 Hydratation du silicate tricalcique C ₃ S	13
I-6-2-2 Hydratation du silicate bi calcique C ₂ S	14
I-6-2-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C ₃ A	14

I-6-2-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C4AF	15
I-7 Conclusion	16
2ème partie : Les ajouts minéraux	
I-9 Généralités	17
I -9-1 Avantages techniques	17
I -9-2 Avantages économiques	17
I-9-3 Avantages écologiques	17
I -10 Définition d'un ciment avec ajout minéral	18
I-10-1 Les principaux ajouts	18
I -10-1-1 laitier granule de hauts fourneaux	18
I -10-1-1-A types de laitier (propriétés et mode de fabrication)	19
I -10-1-1-A-1 Laitier granule	19
I -10-1-1-A-2 Laitier concassé	19
I -10-1-1-A-3 Laitier expansé	19
I -10-1-1-B Caractéristique des laitiers	19
I -10-1-1-B-1 Activité de laitier	20
I -10-1-1-B-2 Laitier acide	20
I -10-1-1-B-3 Laitier basique	20
I -10-1-1-C Traitement du laitier	21
I -10-1-1-D Composition chimique	22
I -10-1-1-E Composition minéralogique	23
I -10-1-2 Fumée de silice	24
I -10-1-3 La pouzzolane	26
I -10-1-4 Les cendres volantes	28
I -10-1-5 Fillers calcaires	30
I-11 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil	30
I-12 Différentes méthodes d'activation	31
I-12-1 Activation chimique	31
I-12-2 Activation thermique	32
I-12-3 Activation mécanique	32
CHAPITRE II	
CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	
1ère partie: matérielles et méthodes	
II-1 Introduction	34
II-2 Sable	34
II-2-1 Origine	34
II-2-2 Exploitation	34
II-2-3 Caractéristiques Physiques Du Sable Utilise	35
II-2-3-1 Masse volumique (absolue)	35
II-2-3-2 Masse volumique apparente	35
II-2-3-3 Equivalent de sable	36

II-2-3-4 Analyse granulométrique	39
II-3 le ciment	42
II-3-1 la composition chimique de ciment	42
II-3-2 caractéristiques physiques	43
II-4 Le laitier	43
II-4-1 Composition chimique	43
II-5 Eau de gâchage	44
II-5-1 Composition chimique de l'eau	44
2ème partie : partie expérimentale	
II-6 Introduction	46
II-6-1 La composition du mortier	46
II-6-2 La confection des éprouvettes	46
II-6-3 La procédure de conservation	47
II-6-4 La description des essais expérimentaux employés	48
II-6-4-1 Méthodes employées pour l'évaluation des résistances mécaniques	48
II-6-4-1-1 Traction par flexion	48
II-6-4-1-2 Compression	49
II-6-4-1-3 Expression des résultats	49
CHAPITRE III RESULTATS ET INTERPRETATION	
III-1 Introduction	51
III-2 Analyses chimiques des ciments utilisés	51
III-3 Essai sur la pâte de ciment	51
III-3-1 La consistance normalisée	51
III-3-2 L'essai de prise	51
III-4 La résistance à la flexion et la compression de mortier	53
Conclusion générale	
Bibliographie	

Liste des Tableaux :

N ^o Tableau	Intitulé	N ^o Page
PRIMIER CHAPITER		
Tableau I-1	Principales catégories de ciment.	6
Tableau I-2	Composition chimique du clinker.	7
Tableau I-3	Composition potentielle d'après les formules Empiriques de BOGUE.	11
Tableau I-4	Compositions minéralogiques moyennes des clinkers.	11
Tableau I-5	Microstructure élémentaire des quatre minéraux.	12
Tableau I-6	La composition chimique moyenne du laitier.	22
Tableau I-7	Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.	24
Tableau I-8	Composition chimique type de certaines fumées de silice.	25
Tableau I-9	Composition chimique type de certaines cendres volantes.	29
DEUXIEME CHAPITER		
Tableau II-1	Analyse granulométrique du sable.	40
Tableau II-2	Caractéristiques physiques du sable.	42
Tableau II-3	composition chimique des six types de ciment utilise.	42
Tableau II-4	Caractéristiques physiques du ciment CRS	43
Tableau II-5	Composition chimique de laitier.	43
Tableau II-6	Composition chimique de l'eau.	45
TROISIEME CHAPITRE		
Tableau III-1	la consistance et début de prise et fin de prise.	52

Liste des Figures :

N ^o Figure	Intitulé	N ^o Page
PRIMIER CHAPITER		
Figure I-1	Image de clinker en microscope optique (section polie).	9
Figure I-2	C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O).	14
Figure I-3	Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.	15
Figure I-4	représentation des principaux ajouts cimentaires dans un diagramme ternaire SiO ₂ – CaO – Al ₂ O ₃ .	22
DEUXIEME CHAPITER		
Figure II-1	Définition de l'équivalent de sable.	38
Figure II-2	Equivalent de sable avec piston et visuel.	38
Figure II-3	Analyse granulométrique du sable.	40
Figure II-4	Mesure de la fluidité du mortier.	47
Figure II-5	Moules (4×4×16).	47
Figure II-6	Table vibrante.	47
Figure II-7	Chambre humide.	48
Figure II-8	Appareil traction par flexion.	49
Figure II-9	Presse de compression.	49
TROISIEME CHAPITRE		
Figure III-1	la résistance à la flexion conservation à l'air.	53
Figure III-2	la résistance à la compression conservation à l'air.	53
Figure III-3	la résistance à la flexion conservation C1 à 40°C.	54
Figure III-4	la résistance à la compression conservation C1 à 40°C.	55
Figure III-5	la résistance à la flexion conservation C3 à 40°C.	55
Figure III-6	la résistance à la compression conservation C3 à 40°C.	56

Figure III-7	la résistance à la flexion conservation C7 à 40°C.	56
Figure III-8	la résistance à la compression conservation C7 à 40°C.	57
Figure III-9	la résistance à la flexion conservation C1 à 60°C.	57
Figure III-10	la résistance à la compression conservation C1 à 60°C.	58
Figure III-11	la résistance à la flexion conservation C3 à 60°C.	58
Figure III-12	la résistance à la compression conservation C3 à 60°C.	59
Figure III-13	la résistance à la flexion conservation C7 à 60°C.	59
Figure III-14	la résistance à la compression conservation C7 à 60°C.	60
Figure III-15	la résistance à la flexion CRS _t à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	60
Figure III-16	la résistance à la compression CRS _t à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	61
Figure III-17	la résistance à la flexion CRS10%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	61
Figure III-18	la résistance à la compression CRS10%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	62
Figure III-19	la résistance à la flexion CRS20%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	62
Figure III-20	la résistance à la compression CRS20%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	63
Figure III-21	la résistance à la flexion CRS30%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	63
Figure III-22	la résistance à la compression CRS30%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	64
Figure III-23	la résistance à la flexion CRS50%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	64
Figure III-24	la résistance à la compression CRS50%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	65
Figure III-25	la résistance à la flexion CRS70%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	65
Figure III-26	la résistance à la compression CRS70%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).	66
Figure III-27	la résistance à la flexion CRS _t à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	66
Figure III-28	la résistance à la compression CRS _t à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	67
Figure III-29	la résistance à la flexion CRS10%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	67
Figure III-30	la résistance à la compression CRS10%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J)	68
Figure III-31	la résistance à la flexion CRS20%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	68
Figure III-32	la résistance à la compression CRS20%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	69

Figure III-33	la résistance à la flexion CRS30%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	69
Figure III-34	la résistance à la compression CRS30%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	70
Figure III-35	la résistance à la flexion CRS50%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	70
Figure III-36	la résistance à la compression CRS50%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	71
Figure III-37	la résistance à la flexion CRS70%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	71
Figure III-38	la résistance à la compression CRS70%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).	72
Figure III-39	Comparaison ente la résistance à la compression du mortier à température 40°C et 60°C et à C1j.	72
Figure III-40	Comparaison ente la résistance à la compression du mortier à température 40°C et 60°C et à C3j.	73
Figure III-41	Comparaison ente la résistance à la compression du mortier à température 40°C et 60°C et à C7j.	73

INTRODUCTION GENERALE :

La valorisation du laitier des hauts fourneaux dans le domaine de la construction, vise d'une part la sauvegarde de l'environnement et d'autre part, l'utilisation rationnelle et économique des matériaux locaux. En effet, l'emploi du laitier en cimenterie comme ajout au clinker, ou sa transformation en liant hydraulique exempt de clinker, constitue des débouchés importants en raison de son faible coût énergétique. De par ses caractéristiques physiques et mécaniques, comparables à celles des matériaux naturels, le laitier présente une composition chimique proche de celle d'un ciment Portland, qui lui confère un caractère hydraulique latent.

L'objectif de ce travail:

Activer thermiquement le laitier dans le mortier afin de recouvrir, aux jeunes âges, un niveau de performance équivalent à celui obtenu dans les mortiers témoin. L'étude sur mortier a été pour but de définir l'influence de différents paramètres tels que la nature du ciment et le taux du laitier, la cure et la température sur différentes propriétés (les résistances mécaniques).

Structuration du mémoire :

Ce travail est présenté en chapitres regroupés comme suit :

Introduction générale

Chapitre I : synthèse bibliographique ;

Chapitre II: Caractéristiques des matériaux ;

Chapitre III : Résultats et interprétations.

Conclusion Générale et Perspectives

CHAPITRE I

Synthèse

Bibliographique

1ère partie : le ciment

I-1 Introduction :

Le ciment (du latin caementum, signifiant moellon, pierre de construction) est une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entrainant deux corps durs pour les lier.

C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, pour agréger du sable fin, pour produire du mortier, ou des graviers (granulats), pour produire du béton. Le mot « ciment » peut désigner différents matériaux comme :

- Le plâtre,
- La chaux commune,
- La pouzzolane naturelle,
- Le ciment prompt,
- Le ciment Portland ou ciment artificiel.

Un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels (de la main de l'homme) de silice, d'alumine, de carbonate de chaux, sur lesquels l'eau n'a aucune action, ou qu'une action très lente avant la trituration, et qui, réduits en poudre mécaniquement, font prise sous l'action de l'eau, dans un délai qui varie selon leur proportion.

I-2 Histoire des ciments :

Le ciment aurait été inventé par les Égyptiens et a été amélioré par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à de l'argile. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage a été repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées, dont l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, dans la région de Naples, en Italie) est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité

des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques, ou chaux limites, en 1840.

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

En 1796, James Parker découvrit sur l'Île de Sheppey, en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900 °C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptisa commercialement ciment romain. Ce ciment acquit par la suite, de 1820 à 1920 environ, une grande réputation. Il fut fabriqué

dans toute l'Europe et servait à faire des moulages au gabarit, ou à fabriquer des pierres artificielles de ciment moulé. Au début du XIXe siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux Britanniques ni à la pouzzolane italienne. Et le Français Louis Vicat découvrit en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux - concernant la proportion d'argile et la température de cuisson - et publia ses travaux sans prendre de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin déposa un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appela commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemblait aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland »

situées en Manche. C'est un ciment similaire à ceux que décrivit Vicat, encore que son brevet soit imprécis. Mais il fallut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits aujourd'hui ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1 450 °C qui permit d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes, et voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé.

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

I-3 Constituants principaux du ciment et les additions :

I-3-1 Constituants du clinker :

I-3-1-1 Préparation de la matière première :

Le mélange de calcaire et d'argile est broyé, en un mélange très fin, qu'on appelle le " cru " des corrections de composition peuvent être effectués en incorporant des ajouts en faible proportion.

Le produit cuit (clinker) est refroidi, puis broyé avec une petite quantité de gypse (additif indispensables destiné à régularisé la prise) dans d'énormes broyeurs à boulets est amené ainsi à une grande finesse de mouture.

Afin de rendre la matière plus réactive (plus grande la surface spécifique, plus la réactivité chimique est importante). Selon le cas, on ajoute ainsi au broyage du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, ou des pouzzolanes et fillers (calcaire ou tuf).

I-3-1-2 Qualité du clinker :

Dans la fabrication du ciment, une bonne préparation (mélange) est calculée pour avoir un rapport (rapport de saturation en chaux) m proche de 1.

$$m = 100 \left[\frac{\text{CaO} + 0.75\text{MgO}}{(2.85 \text{SiO}_2 + 1.18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{Fe}_2\text{O}_3)} \right] [01].$$

Si $m=1$ toute la chaux est consommée.

L'art du cimentier consiste à se rapprocher au maximum de cette valeur, Mais en réalité on prend une quantité de quelque pour cents inférieure à ces valeurs.

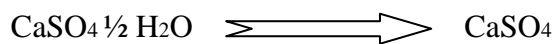
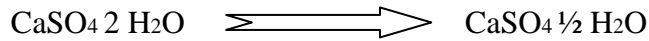
I-3-2 Le Sulfate de Calcium (Le gypse - CaSO₄) :

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité **2.3**. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté (CaSO₄, 2(H₂O)). Le gypse est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

Le sulfate de calcium (gypse CaSO₄.2H₂O) est un régulateur de prise ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication de 3 à 5% de la masse du ciment.

La teneur en SO₃ ne doit pas dépasser 3.5% dans le ciment .Pour chaque nature de clinker, il existe un pourcentage optimal de gypse qui donne à la fois les meilleurs résistances et le retrait minimal.

Pendant le broyage sous l'effet de la température atteinte pendant le broyage et le stockage. Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment.



I-4 Principales Catégories des Ciments :

D'après la norme ENV 197-1 définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme au Tableau 1-page 4.

Tableau I-1 : Principales catégories de ciment.

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

Avec les notations abrégées correspondantes qui sont comme suit : CEM pour indiquer que le produit est un ciment. Un chiffre romain 1, 2, 3, 4 ou 5 pour indiquer le type de ciment Pour le ciment 2 ; 3 ; 4 et 5 une lettre A, B, C pour indiquer la proportion des constituants Le

nombre indiquant la classe de résistance 32.5 , 42.5 , 52.5 suivi le cas échéant de la lettre R pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours) .

I-5 Les Constituants anhydres du ciment (CEM I) :

I-5-1 Composition chimique :

Le ciment portland résulte du broyage du clinker qui se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée .Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange bien précis de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute 5% de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) destinier à régulariser la prise. [02,03]

Les principaux oxydes (Tableau I-1) sont en % pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence X d'un clinker de ciment portland. qui consiste à exciter l'échantillon à l'aide d'un tube à RX et d'analyser le spectre (en longueurs d'onde ou en énergie) de rayons X émis.Ce spectre est représentatif de la composition élémentaire de l'échantillon. [01]

Tableau I-2 : Composition chimique du clinker [01].

Elément	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2
Fourchette(%)	62à68	18à24	4à8	2à5	0à5	0à5	0à2	0à2	0à2
Moyenne(%)	66.6	21.9	6.3	2.5	1	0.8	0.2	0.2	0.2

I-5-2 Performance des ciments :

Pour contrôler la qualité et la régularité de la fabrication du clinker à partir des oxydes dans les cimenteries .Certains modules ou indice chimiques sont nécessaires à calculer.

Module hydraulique de Michaelis (M_h) compris entre (1.7 et 2.3) :

$$M_h = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Module silicique de Kühl compris entre (1.5 et 5) :

$$M_h = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Modules alumino-ferrique (M_{af}) de Kühl compris entre (1.5 et 2.5) :

$$\text{Maf} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Indice d'hydraulicité de Vicat compris entre (0.4 et 0.5):

$$\text{HI} = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO} + \text{MgO}$$

Les composés sont exprimés en moles et non en pour-cent.

Indice de saturation en chaux de Kühl compris entre (0.85 et 1) :

$$\text{LSI} = \text{CaO} / 2.8 \times \text{SiO}_2 - 1.1 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Facteur de saturation de Lea Parker compris entre (0.85 et 1):

$$\text{Msat (LSF)} = \text{CaO} / 2.8 \times \text{SiO}_2 - 1.18 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$$

C'est le rapport de la chaux (CaO) totale dans le mélange à la chaux susceptible de se combiner avec les autres oxydes (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O) plus le Msat est élevé plus les résistances le sont aussi.

I-5-3 Composition minéralogique :

Les compositions minéralogiques des ciments Portlands est fonction du mélange

(clinker + 5% de gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [01].

Il contient quatre principaux composants:

- Le silicate tricalcique (alite) : 3CaO, SiO₂ : C₃S
- Le silicate bicalcique (bélite) : 2CaO, : SiO₂ C₂S
- L'aluminate tricalcique (célite) : 3CaO, Al₂O₃ : C₃A
- L'alumino-ferrite tétracalcique (célite) : 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃: C₄AF

I-5-3-1 Le silicate tricalcique (Alite) C₃S :

- Se forme vers 1400 à 1450 °C, sa densité d= 3.15
- Il contient, en solution, des impuretés MgO, Al₂O₃ et Fe₂O₃

- *Se présente en gros cristaux pseudo hexagonaux jointifs ou maclés, la taille varie suivant la cuisson de 10 à 50 μm .

Les réactions d'hydratation du C_3S sont plus rapides que celle de C_2S , et libérant une quantité de chaleur proche du double de celle libérée par C_2S , ce qui donne au ciment une résistance initiale rapide et élevée.

I-5-3-2 Le silicate bicalcique (belite) C_2S :

Il existe plusieurs formes allotropiques, la forme la plus active se trouve dans le ciment portland est la forme β qui possède des propriétés hydrauliques. Se forme entre 1200 à 1300°C, sa densité $d=3.28$.

Il contient en suspension solide, des impuretés P_2O_5 (anhydre phosphorique) et BaO (oxyde de baryum) Les cristaux ont souvent des formes arrondies de taille de 30 μm en moyenne suivant la cuisson (voir figure I-1).

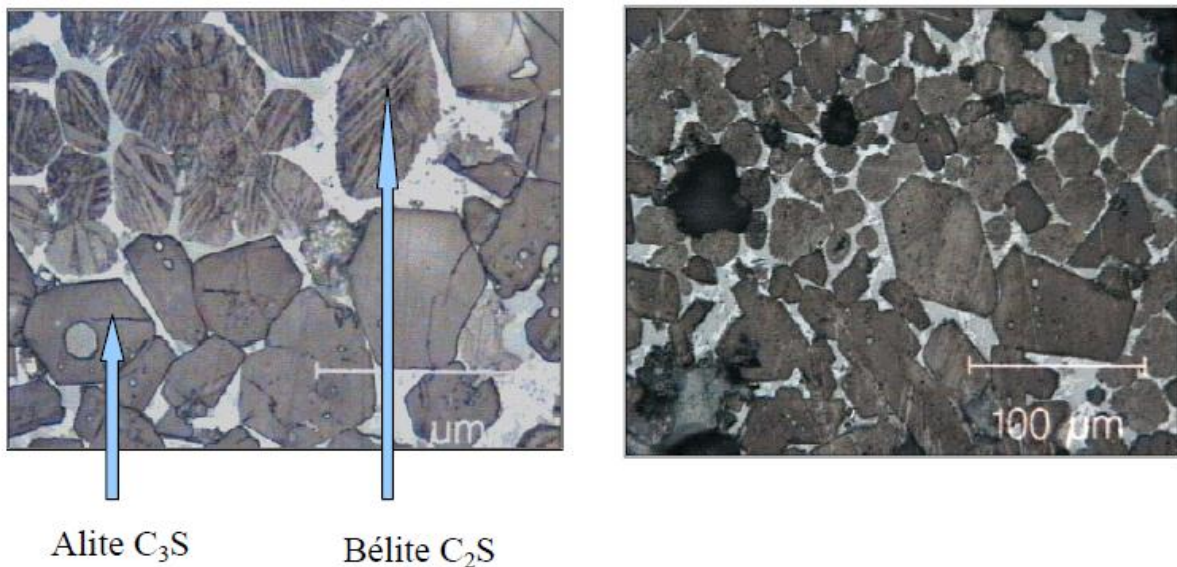


Figure I-1 : Image de clinker en microscope optique (section polie) [02].

I-5-3-3 Les aluminates tricalciques (C_3A) :

- Le C_3A à une densité proche de 3,04.
- Il existe plusieurs aluminates parmi lesquels, on peut citer 3 composés présentant des propriétés hydrauliques.
- CA et C12A17 que l'on trouve dans les ciments alumineux.

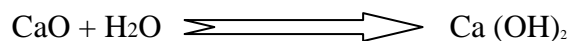
- L'hydratation des C3A est très rapide et exothermique (l'ajout du gypse au clinker à pour effet de contrôler sa cinétique d'hydratation)
- Le C3A contribue à la prise du ciment par contre, il contribue assez peu à la résistance finale.
- Le C3A contient des impuretés (Na₂O) et se présente sous plusieurs formes allotropiques dont la réactivité vis-à-vis de l'eau est variable.

I-5-3-4 L'alumino -ferrite tétracalcique :

Il forme un solide de C₂A et C₂F (C₄AF, C₆A₂F), leurs réactions d'hydratation sont voisines de celles du C₃A.

I-5-3-5 La chaux libre CaO :

Elle est cristallisée dans le système cubique, sa densité est de 3.18 sa présence dans le ciment est proscrite ($\leq 2\%$) notant cependant les problèmes posés par son hydratation.



Volume molaire : $56/3.18 = 17.6 \text{ cm}^3$ $74/2.34 = 31.6 \text{ cm}^3$ $100 \Delta V/V = 80\%$ Extinction de la chaux provoque un gonflement important ce qui conduit à des désordres en cas d'hydratation tardive de CaO.

I-5-4 Composition potentielle du ciment (équation de bogue) :

Les tableaux (1-3) et (1-4) illustrent les compositions minéralogiques des clinkers [1,5].

Les tableaux (1-3) et (1-4) illustrent les compositions minéralogiques des clinkers [1,5].

Tableau I-3 : Composition potentielle d'après les formules Empiriques de BOGUE [01].

Le clinker	
Formules chimiques	Formules de Bogue
Le silicate tricalcique ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) : C_3S	4.07. CaO-7.6. SiO_2 -1.43. Fe_2O_3 -6.72. Al_2O_3
Le silicate bicalcique ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) : C_2S	2.87. SiO_2 -0.75. C_3S
L'alumino tricalcique ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) : C_3A	2.65. Al_2O_3 -1.69. Fe_2O_3
L'alumino-ferrite trécalcique ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) : C_4AF	3.04. Fe_2O_3

Tableau 1-4 : Compositions minéralogiques moyennes des clinkers [01].

Constituants	Alite	Bélite	Célite	Célite
Notation cimentiers simplifiée	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Notation cimentiers détaillée	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
Teneurs (%)	50-75	07-30	0-16	04-40

On peut remarquer que la méthode empirique de Bogue qui se base sur la composition chimique conduit aux mêmes résultats de quelques pour-cent près comparativement aux méthodes modernes comme exprimés aux (Tableaux 1-4).

La séquence des réactions et les formules sont exprimées comme suit:

* Le C_4AF se forme en premier

* Le C_3A se forme ensuite

* La chaux (CaO) et SiO_2 restant se combinent pour former C_2S et C_3S .

I-5-5 Composition chimique des minéraux :

Le Tableau (1- 5) montre bien la microstructure élémentaire des quatre minéraux selon une analyse par microsonde électronique de casting : analyse élémentaire ponctuelle (les résultats sont donnés sous forme d'oxyde) [01].

Tableau 1-5 : Microstructure élémentaire des quatre minéraux [01].

Oxyde	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CaO	74.2 ± 0.5	64.2 ± 0.6	57 ± 2.0	50.7 ± 0.5
SiO ₂	24.5 ± 0.3	30.8 ± 0.8	4.4 ± 0.1	3.8 ± 0.2
Al ₂ O ₃	1.6 ± 0.2	2.2 ± 0.4	25.2 ± 0.9	17.4 ± 0.6
Fe ₂ O ₃	0.57 ± 0.07	0.63 ± 0.06	6.9 ± 0.6	18.5 ± 0.7
MgO	0.34 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.66 ± 0.01	1.96 ± 0.09
SO ₃	0.30 ± 0.06	1.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.09 ± 0.04
K ₂ O	0.03 ± 0.01	0.3 ± 0.05	0.1 ± 0.04	0.03 ± 0.01
TiO ₂	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.5 ± 0.1	2 ± 0.2

I-6 Hydratation du ciment Portland :

I-6-1 Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique, il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [3]:

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

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

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se

produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 – 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul.

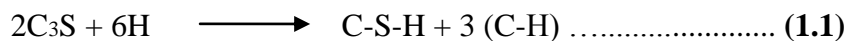
La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

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

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

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

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



Où C-S-H représente le 3CaO.2SiO₂. 3H₂O (Silicate de calcium hydraté) et (C-H) représente le Ca(OH)₂(Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S (figure II.2) sont :

- les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés.
- La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g).
- La cohésion des feuillets de C-S-H est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales.

L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est

l'hydroxyde de calcium C-H (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.

La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [4].

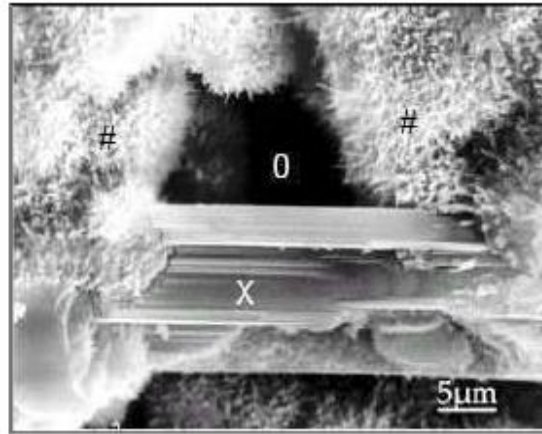
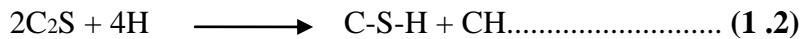


Figure I-2 : C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X)

entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O) [5]

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

Une fois hydraté, C_2S donne aussi des C-S-H. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C_3S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stoechiométrie, l'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de C-S-H et 39% de CH alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de C-S-H et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

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

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

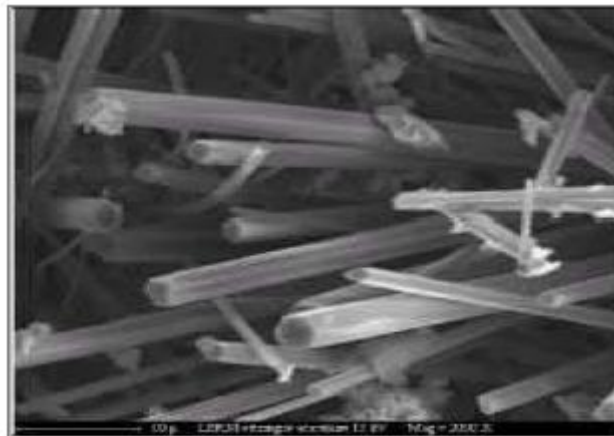
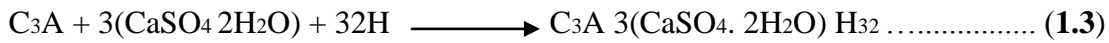


Figure I-3 : Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [6].

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite.

Il apparaît donc secondairement un monosulfo aluminat qui se cristallise en plaquettes hexagonales [10]. La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [7].

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

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminat de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminat.

Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte.

La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [8]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I-7 Conclusion :

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

2ème partie : Les ajouts minéraux

I-9 Généralités :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou pouzzolanique.

L'utilisation d'ajout cimentaire (laitier) dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

I -9-1 Avantages techniques :

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée.

L'ajout cimentaire (calcaire) améliore généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, l'ajout cimentaire (calcaire) améliore la résistance à la fissuration.

I-9-2 Avantages économiques :

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland.

Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO₂. Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

I-9-3 Avantages écologiques :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général l'utilisation de calcaire comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie.

Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques de l'ajout cimentaire calcaire sur le ciment.

I-10 Définition d'un ciment avec ajout minéral :

Le ciment obtenu en ajoutant au clinker (entre 65 et 94%), avant broyage, d'autres composants tels que du laitier, des pouzzolanes, des schistes calcinés, des cendres volantes...etc. D'un coût moindre que ciment portland, il convient bien pour tous les travaux courants de maçonnerie et de béton armé ou précontraint et pour travaux massifs exigeant une élévation de température modérée mais craint les eaux agressives.

I-10-1 Les principaux ajouts :

A : Les ajouts inertes :

Les ajouts inertes sont des produits qui n'ont aucune influence sur le processus de fabrication, d'hydratation et de durcissement du ciment, ces ajouts finement broyés sont ajoutés au clinker avant le broyage.

B : Les ajouts actifs :

On appelle ajouts minéraux actifs les substances naturelles ou artificielles finement broyées et ajoutées au clinker avant ou après le broyage, améliorent la résistance de ciment et son pouvoir hydraulique.

I-10-1-1 laitier granule de hauts fourneaux :

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique.

Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 µm pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du Ca(OH)₂, fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques.

I-10-1-1-A types de laitier (propriétés et mode de fabrication) :

I-10-1-1-A-1 Laitier granule :

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

I-10-1-1-A-2 Laitier concassé :

C'est un granulat lourd d'aspect anguleux, rugueux, de structure micro alvéolaire de couleur grise il est inattaquable par l'eau, et sa porosité est inférieure à 10% il s'obtient après le coulage des laitiers dans les poches de 1 à 2 m³ qu'on divise dans fausses de 200

à 300 m de longueur, et de 10 à 12 m de largeur, on laisse refroidir après concassage et criblage, on obtient un granulat normalisé et classé.

I-10-1-1-A-3 Laitier expansé :

Il a une structure scoriacée alvéolaire ; de teinte grise, après criblage il se présente

en trois classes granulaires de densité variable. Il a une composition chimique proche de. Silice = 25 à 40%, chaux = 38 à 50%, alumine = 10 à 20%, soufre = 01%. Il s'obtient par une puissante injection d'eau, en dessus du laitier en fusion, l'eau vaporise et on obtient des éléments alvéolaires légers.

I-10-1-1-B Caractéristique des laitiers :

I-10-1-1-B-1 Activité de laitier :

Pour apprécier la qualité du laitier comme adjuvant minérale actifs des liants, on se sert de plusieurs modules .d'abord, on distingue deux catégories de laitier. Laitier acide et basique.

I-10-1-1-B-2 Laitier acide :

C'est un laitier qui contient en majeure partie la silice fondue de 50 a 60%, avec peu d'alumine en présence de 25 a30% de chaux. Ce type de laitier subit un refroidissement lent.

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

I-10-1-1-B-3 Laitier basique :

Il est très hydrauliques pour certaines teneurs on chaux, silice et alumine. Il est obtenu par un refroidissement brusque. Ce type de laitier a un rapport pondéral :

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

CaO = 40 a55 % ; SiO₂ =25 a 35 % , Al₂O₃ =12 a 25 % ; MgO, SO₃, Fe₂O₃ ; FeO ; soufre,
Ces laitiers sont caractérisés par un module de basicité qui répond a la formule :

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

Si Mb > 1. le laitier est acide.

Il y aussi le module d'activité. Ma = (SiO₂ / Al₂O₃).

Si Ma= 0.017 a 0.25, le laitier est basique, et si Ma=0.33 a 0.40 le laitier est acide. Notons que

l'activité hydraulique du laitier croît avec l'augmentation de ces deux modules c'est-à-dire. Plus le module d'activité est grand, plus la vitesse de durcissement du laitier broyé et rapide. Pour synthétiser les qualités que doivent avoir les laitiers on peut dire que.

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

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

*en USA. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3)$

*en URSS. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) 1.2$

* en RFA. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) 1.6$

* en JAPON. $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2) 1.4.$

I-10-1-1-C Traitement du laitier :

Le laitier de haut fourneau sort à l'état de fusion à une température de 1400 à 1500 °C. La conversion en produit diversement utilisable, dépend du traitement ultérieur, on obtient des produits suivants le mode de refroidissement du laitier en fusion.

Lorsqu'on laisse le laitier se refroidir lentement, il se solidifie en une matière grise cristalline, ayant l'aspect de la matière solide «pierre».

Le laitier qui doit servir à la fabrication des ciments au laitier est refroidi très rapidement, soit en plongeant le laitier dans un grand «bassin» ou un excès d'eau, soit en soumettant la coulée de laitier à des jets d'eau ou d'air et d'eau.

Le but de ce traitement est de refroidir le laitier aussi rapidement que la cristallisation ne puisse pas avoir lieu et qu'il se solidifie à l'état vitreux, en même temps brise la matière en petites particules dont la grosseur varie entre celles des perles de verre et celle d'une écume légère. La facilité avec laquelle on y parvient dépend de la composition chimique du laitier et de la température à quel sort du haut fourneau. Les laitier siliceux sont les plus facile à refroidir à l'état vitreux, tandis qu'il est plus difficile d'empêcher la cristallisation des laitier à forte teneur en chaux, à cause de leur activité plus grande en ciment. Après la trempe, le produit granulé contient de l'eau et comme il faut le sécher pour tout les ultérieurs destinés à le transformer en ciment ; il y a avantage à utiliser un mode de trempe, d'où le laitier ressort avec le minimum d'eau si possible. Le contenu de l'eau dans les laitiers granulés est de 5 à 10%.

I-10-1-1-D Composition chimique :

La composition du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minéral généralement.

Tableau I-1 La composition chimique moyenne du laitier.

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

La composition du laitier est présentée sur le même diagramme ternaire utilisé pour définir la composition du ciment portland et autres ajouts cimentaires indiquée à la figure I.1

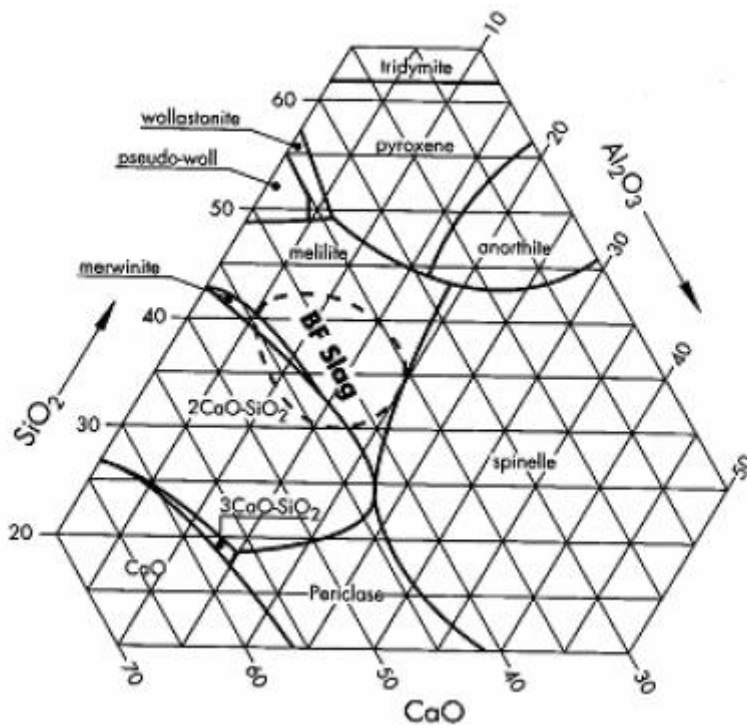


Figure I-1 : représentation des principaux ajouts cimentaires dans un diagramme ternaire.

SiO₂ – CaO – Al₂O₃[9].

I-10-1-1-E Composition minéralogique :

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

* L'anorthite CaO .Al₂O₃ .2SiO₂

*Diopside CaO .MgO .2SiO₂

*Gehlenite 2CaO .Al₂O₃ .2SiO₂

*Akermanite $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$

*Merwinite $3 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$

*Silicate bi calcique sous forme α , α' & β .

*Tri aluminate penta calcique « C5A3 »

*Wollastonite $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

*Rankinite $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$

*Spénelite $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

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

D'un point de vue chimique (tableau I.2), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Tableau I-2 Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.

Oxyde	Laitier français	Laitier Nord U.S.A	Laitier Algérien
SiO_2	26 à 36	33 à 42	38 à 42
Al_2O_3	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe_2O_3	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.
- *Chaleur (étuvage, autoclavage).
- *Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse).

I-10-1-2 Fumée de silice :

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium).

Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme [15] et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 .

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue

chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau 1-3).

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée.

Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 . La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe-Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%. Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse.

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

Tableau I-3 Composition chimique type de certaines fumées de silice.

Composée	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
SiO_2	93.7	87.3	90.0
Al_2O_3	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe_2O_3	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na_2O	0.2	0.2	0.9
K_2O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse.

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction

pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et un amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est (3.1g/cm³).

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise.

Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

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

I-10-1-3 La pouzzolane :

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [10].

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

* Pouzzolane naturelle :

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique:

verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

* Pouzzolane artificielle :

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

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [10]:

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

Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

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

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

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [11] et [12].

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

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

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

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [10]. Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété.

On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ajouts de produits chimiques.
- broyage à une finesse plus élevée.
- traitement thermique.

I-10-1-4 Les cendres volantes :

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

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (1-10) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico- alumineuses (cendre de houille).
- Les cendres sulfocalciques (cendre de lignite).
- Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

Tableau I-4 Composition chimique type de certaines cendres volantes [13].

Componés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo-calcique	Sulfo-calcique
SiO_2	59.4	47.4	36.2	24.0	12.5
Al_2O_3	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe_2O_3	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na₂O	2.2	0.4	2.2	0.8	...
SO_3	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	28.0

La plupart des particules ont un diamètre compris entre $1\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$, leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et $600\text{ m}^2/\text{kg}$. La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable. Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton.

En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces.

I-10-1-5 Fillers calcaires :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes).

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C₃S et du C₃A et à la formation de carboaluminates, germes de cristallisation et points d'ancrage deshydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

I-11 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil:

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile+calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout.

La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles.

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

I-12 Différentes méthodes d'activation :

I-12-1 Activation chimique

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

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

Ce sont surtout :

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

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

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

I-12-2 Activation thermique

L'activation thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) consiste à conserver le matériau (éprouvette) dans une étuve à vapeur à différentes températures de cure 20°C, 40°C et 60°C pendant 7 jours. Ensuite, il sera mis dans un bassin d'eau à une température de 20 °C jusqu'à la date de l'essai mécanique programmé (7, 14 et 28 jours).

I-12-3 Activation mécanique

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

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

- plus de C3S,
- moins de C3A,
- le plus possible de petits cristaux.

Selon certains chercheurs, plus le rapport.

$[(C3S + C2S) / (C3A + C4AF)]$ est élevé, plus facile est le broyage.

CHAPITRE II

Les caractéristiques des matériaux

1ère partie: matérielles et méthode

II-1 INTRODUCTION

Nous avons utilisé pour la confection du mortier des matériaux locaux dont les caractéristiques sont déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil de l'université de M'Sila.

Les matériaux utilisés sont :

- Le sable de rivière fin d'origine silicique de la région de BOUSAADA (OUED MAITER) ;
- Le ciment de CRS CEMI 42.5 Biskra ;
- Le laitier ;
- L'eau potable du laboratoire.

II-2 Sable

II-2-1 Origine

Le sable de base de notre recherche provient des abords de l'OUED M'AITRE. Cet oued est situé entre les collines de BOUSAADA, dont le vent provient du sud est chargé de grains fins.

L'avancée du désert a permis donc au fil des ans, le dépôt du sable dans l'OUED, qui par la suite a assuré son transport et son étalement. Ainsi plusieurs couches de sable fin mélangé aux galets de l'OUED se sont formées sur des profondeurs de plusieurs mètres, le long de l'OUED MAITER.

II-2-2 Exploitation

Au seuil de ces dernières années ; plusieurs entreprises étatiques et privées exploitent des carrières le long de l'OUED avec divers moyens surtout mécaniques.

Le matériau ; mélangé de grains fins et de galets, est passé à travers des tamis de dimensions de mailles égales à 50 mm, puis livré aux différents chantiers de toute la région et ses environs, telles que M'SILA, BOURDJ-BOUARRERIDJ, SETIF, ...etc.

II-2-3 Caractéristiques Physiques Du Sable Utilise

Les caractéristiques du sable (sable de dune) est déterminé expérimentale, au laboratoire de génie civil de l'université de M'SILA, suivant les normes françaises AFNOR [11].

II-2-3-1 Masse volumique (absolue) : NF P 18-555 :

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

* Mode opératoire :

- On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité **1000 ml**.
- On prend **03** échantillons de masse **150g**.
- -On place l'échantillon dans le récipient de capacité **1000 ml** et on y verse **150 ml** d'eau préparé préalablement dans **2^{ème}** récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable – eau. Soit (V) ce volume.
- Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul. Volume de sable : $V_1 = V - 150$ (ml)
- -La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule: $\rho = \frac{M}{V_1}$ Avec :

$$M = 150g$$

II-2-3-2 Masse volumique apparente : NF P 18-554 :

II-2-3-2-1 Masse volumique apparente à l'état lâche:

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

* Mode opératoire :

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité **2 à 2,5 litres**.

- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M_1 .
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de **10 à 15** cm et on le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M_2 ce poids.
- Volume de récipient $V_r = 1000 \text{cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

II-2-3-2-2 Masse volumique apparente à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est Supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

* Mode opératoire :

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient « après tassement » on soumet ce dernier à **30** secousses manuelles.

On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit M_2 le poids de l'ensemble (sable + récipient), la masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho_c = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

M_1 : Masse du récipient à vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient.

II-2-3-3 Equivalent de sable : NF P 18-598 :

Nous essayons de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier.

*** Mode opératoire :**

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à **500 g**).
- Prendre une pesée de **120 g**.
- Remplir l'éprouvette de solution la vante jusqu'au premier repère (**10cm**).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (**120g**) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
 - Laisser reposer pendant **10** minutes.
 - Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer **90** cycles de **20** cm de cours horizontale en **30** secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
 - Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vante au-dessus de l'éprouvette,
- Rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux.
- Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le **2^{ème}** repère. Laisser ensuite reposer pendant **20** minutes.

A/ Equivalent de sable visuel (ESV):

- -Après **20** minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieure du floculant
- Jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie Sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \text{ [%]}$$

Où :

$h_2 < h_1$ Avec : h_1 : sable propre + éléments fins.

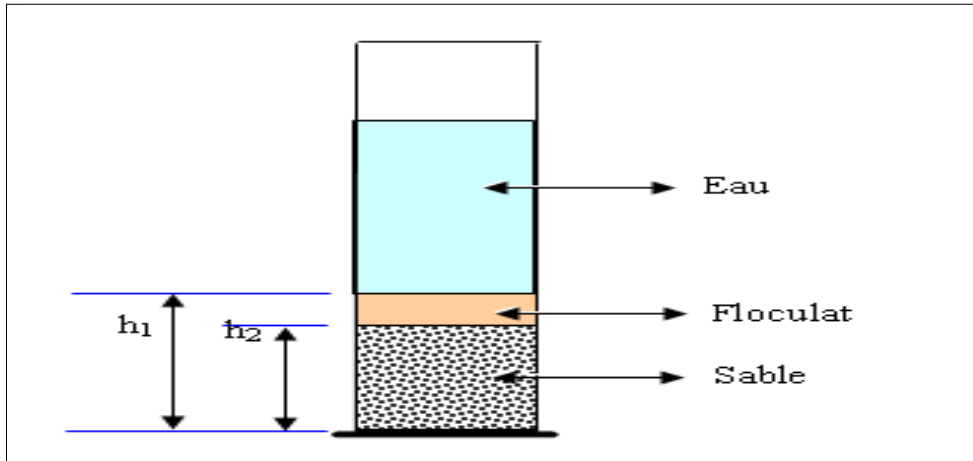


Figure II -1: Définition de l'équivalent de sable.

B/ Equivalent de sable avec piston (ESP):

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repousseur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le réglett dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre laFace intérieure de la tête du piston. Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \text{ [%]}$$

Où h'_2 : La hauteur du sable ($h'_2 < h_1$)

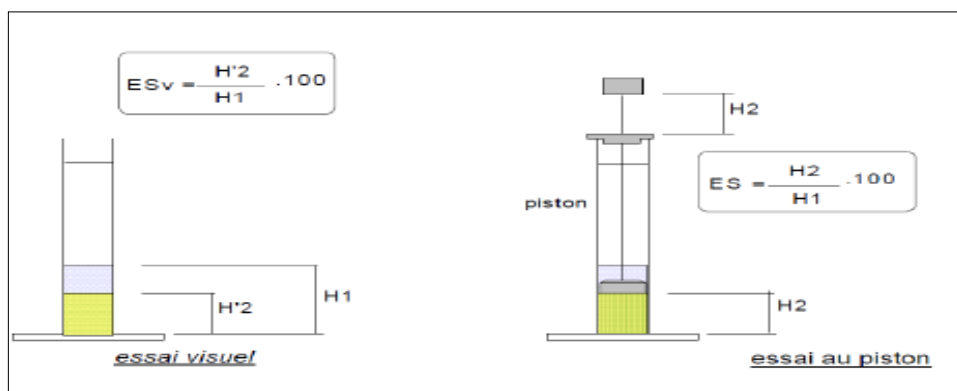


Figure II-2: Equivalent de sable avec piston et visuel.**II-2-3-4 Analyse granulométrique: (NF P 18-560):***** Mode opératoire :**

- Prélever (**1,5 kg**) de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : **5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125** et éventuellement **0,08mm**. La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.
- Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine
- D'agitation mécanique, agité pendant **5** minutes. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.
- Peser chaque tamis séparément à **1 g** près. Soit M_i la masse du tamis (I) + le sable. La
- Différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel R_1 du tamis1.
- Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.
- -Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse
- Du refus cumulé du tamis 2 ($R_2=R_1$ +Refus partiel sur tamis).
- -Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les
- Masse des différents refus cumulés R_3, R_4, \dots

Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante : **$T = 100 - R_C$**

Où :

* T: Tamisât en %

* R_C : Refus cumulés en %

Tableau II-1. : Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	23.9	23.9	1.59	98.41
2.5	170.6	194.5	12.97	87.03
1.25	170.7	365.2	24.35	75.65
0.63	147.4	512.6	34.17	65.83
0.315	655.3	1167.9	77.86	22.4
0.125	282.4	1450.3	96.68	3,32
0.08	44.8	1495.1	99.67	0,33
Fond	4.5	1499,6	99,97	0,03

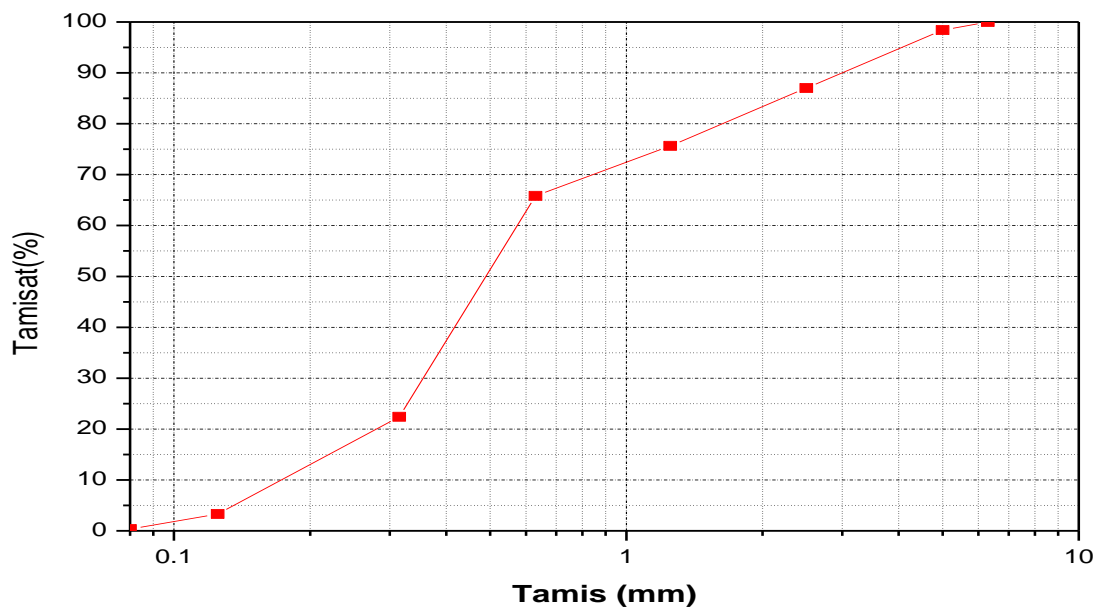


Figure II-3: Analyse granulométrique du sable.

Module de finesse :

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles :

[0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

Où : R_c : Refus cumulé.

Pour le sable de Boussaâda : $M_f = 2.47$

*Les normes soviétiques spécifient le M_f des sables comme suit :

-Sable gros $M_f > 2.5$

-Sable moyen $2 < M_f < 2.5$

-Sable fin $1.5 < M_f < 2$

-Sable très fin $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant:

Pour le sable de Boussaâda : $2 < M_f < 2.5$: C'est un **sable moyen**

Les résultats obtenus dans cette étape sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tableau II-2 : Caractéristiques physiques du sable

Caractéristiques		Sable	Norme
Masse spécifique (g/cm ³) *absolue*		2.54	NF P 18-555
Masse volumique apparente	Etat (g/cm ³) lâche	1.46	NF P 18-555
	Etat (g/cm ³) compact	1.66	
Porosité	Etat (g/cm ³) lâche	42.51	NF P 18-554
	Etat compact (%)	34.64	
Equivalent de sable	E.S.V (%)	71.42	NF P 18-598
	E.S.P (%)	69.61	
Teneur en eau (%)		1.01	NF P 18-555
Degré d'absorption d'eau (%)		2.02	NF P 18-555

II-3 le ciment

II-3-1 la composition chimique de ciment :

On a dans nos compositions :

CRSt = 450g du CRS 42.5+ 0% de laitier.

CRS10%L = 405g de CRS 42.5 + 10% de laitier.

CRS20%L = 360g de CRS 42.5 + 20% de laitier.

CRS30%L = 315g de CRS 42.5 + 30% de laitier.

CRS50%L = 225g de CRS 42.5 + 50% de laitier.

CRS70%L = 135g de CRS 42.5 + 70% de laitier.

Tableau II-3 : composition chimique des six types de ciment utilise.

Nom de l'échantillon	CRSt	CRS10%L	CRS20%L	CRS30%L	CRS50%L	CRS70%L
SiO ₂ (%)	21,18	21.75	23.72	25.3	30.74	34.82
Al ₂ O ₃ (%)	4.32	4.69	5.54	6.16	8.13	9.41
Fe ₂ O ₃ (%)	4.99	4.58	4.1	3.77	2.49	1.73
CaO (%)	61.69	60.86	59.65	58.57	56.08	53.89
MgO (%)	2.09	2.26	3.02	3.62	5.62	7.05
SO ₃ (%)	2.2	2.1	2.11	2.08	2.07	1.99
K ₂ O (%)	0.47	0.5	0.48	0.46	0.45	0.44
Na ₂ O (%)	0.1	0.1	0.1	0.11	0.12	0.13

II-3-2 caractéristiques physiques :

Les différentes caractéristiques mesurées au laboratoire de l'université de m'sila.

Tableau II-4 : Caractéristiques physiques du ciment CRS

Caractéristiques	CRS
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.01
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.9
Surface spécifique (g/cm ²)	3674

II-4 Le laitier

Le laitier de haut fourneau d'El-Hadjar utilisé dans notre étude expérimentale est un silico-aluminate de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui sont : (SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO).

II-4-1 Composition chimique :

La composition chimique du laitier utilisé est donnée au tableau III-5. La détermination de cette composition a été effectuée la cimenterie Hammam dalaa (ACC).

Tableau II-5 : Composition chimique de laitier

	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O
Laitier	36.03	11.35	0.76	41.97	7.32	1.89	0.45	0.16

A- Indice de basicité :

Les indices de basicité « I_b » indiquent si un laitier basique ou acide. Donc, les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$I_{b1} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} \approx 1.37, I_{b2} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} = 1.16, I_{b3} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + Al_2O_3} = 1.04$$

On remarque, qu'il y a une différence entre les résultats obtenus, ce qui s'explique par les différents constituants du laitier (déchets industriels).

Il faut noter que les facteurs qui influent sur le pouvoir hydraulique du laitier sont au nombre de trois :

- La composition chimique (elle nécessite des quantités suffisantes en chaux et (en alumine),
- Le degré de vitrification (dissolution des produits amorphes),
- La surface spécifique (surface de contact eau-laitier).

II-5 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable fournie au laboratoire de génie civil. Cette eau est acceptable pour la confection du mortier étudié.

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

II-5-1 Composition chimique de l'eau :

La composition chimique de l'eau du laboratoire de génie civil est établie en laboratoire de département de chimie (M'sila). Elle est donnée par le tableau II-6

Tableau II-6 Composition chimique de l'eau.

	Teneur en (mg / l)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl^-	234.3
Sulfate So_4^-	351.60
Magnésium Mg^{2+}	110.8
Sodium Na^+	/
Calcium Ca^{2+}	267.2
Sédiment sec	1412
Rééligibilité d'oxydation en eau	1024

2^{ème} partie : partie expérimentale

II-6 INTRODUCTION

Cette partie consiste à présenter d'une façon globale les expériences effectuées concernant :

- La composition du mortier ;
- La confection des éprouvettes ;
- La procédure de conservation ;
- La description des essais expérimentaux employés.

II-6-1 La composition du mortier :

Le mortier est un mélange intime dans des proportions convenables (suivant la destination et l'emploi du mortier) de sable, de liant de l'eau, pour former une pâte de plasticité déterminée après mélange et une sorte de pierre naturelle après durcissement.

Le rapport E/C est variant en fonction du type de ciment, Ce rapport est déterminé à partir d'un essai dit « essai de cône » normalisé en EX-URRS pour déterminer la fluidité du mortier. On note ici que cette essai consiste à déterminer la fluidité du mortier en tant compte la profondeur d'enfoncement dans la pâte de mortier d'un cône métallique pesant 300g et ayant un angle au sommet de 30 degrés (figure II-1).

II-6-2 La confection des éprouvettes :

Pour la préparation des éprouvettes, nous avons procédé de la façon suivante :

- Préparer une série des moules des dimensions 4×4×16 cm convenables, avec la quantité du mortier (figure II-2);
- Huiler les moules et vérifier leurs serrages ;
- Remplir les moules par le mortier, l'exécuter en deux couches ;
- Compacter le mortier à l'aide d'une table à chocs (figure II-3), en appliquant 30 coups par couche. Il faut qu'elle soit bien arasée à l'aide d'une règle métallique et placée lentement sur la face du moule ;
- Conserver les éprouvettes dans leurs moules jusqu'au démoulage ;
- Démouler les moules après 24 heures de leur confection.

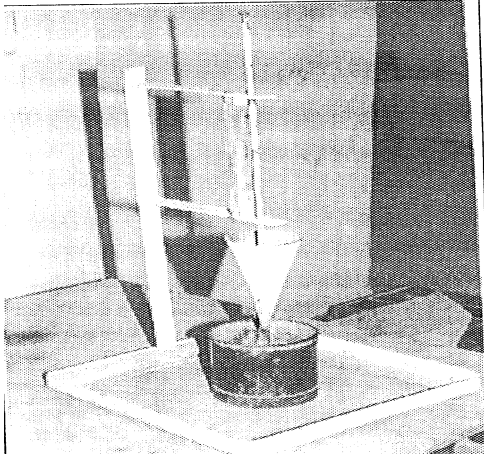


Figure II.1 : Mesure de la fluidité du mortier.



Figure II-3 : table vibrante.



Figure II-2 : moules (4×4×16).

II-6-3 La procédure de conservation :

Les essais mécaniques ont lieu sur les éprouvettes et sont testés .en flexion et en compression à 2,7 et 28 jours.

Elles sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité De 40°C et 60°C (Figure II-4).



Figure II-4 : chambre humide.

II-6-4 La description des essais expérimentaux employés :

Essai pour évaluation les résistances mécaniques (compression, flexion,).

Cet essai, est réalisée sur plusieurs éprouvettes en mortier ayant des compositions différentes pour la détermination : les résistances mécaniques (compression, flexion). Une description de cet essai est donnée ci-après.

II-6-4-1 Méthodes employées pour l'évaluation des résistances mécaniques :

II-6-4-1-1 Traction par flexion :

Ce test a été réalisé sur des éprouvettes de mortier de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm à des âges 2, 7 et 28 jours.

L'éprouvette était placée symétriquement entre les éléments de l'appareil (figure II-5) de la flexion. Deux de ces éléments servaient d'appuis, le troisième était destiné à appliquer un moment fléchissant au milieu de l'éprouvette. Après rupture de cette dernière les valeurs sont lues directement sur la règle de l'appareil d'essai ; la charge de rupture (en N), la contrainte de traction (en N/cm^2) et la contrainte de flexion (en N/cm^2). Les deux morceaux obtenus étaient marqués et testés en compression.

II-6-4-1-2 Compression :

Ce test a été donc réalisé sur les deux morceaux obtenus après rupture des éprouvettes par flexion.

L'appareil utilisé est une presse automatique (figure II-6) ayant une force maximale de 1500 KN et destinée à la compression de plusieurs types d'éprouvettes (cylindriques et prismatique). Les échantillons étaient placés au milieu de l'appareil, la surface de contact entre ces derniers et les plateaux de compression était environs de 16 cm. L'augmentation de la charge de compression se faisait automatiquement et la force de rupture était indiquée en KN par aiguille.

II-6-4-1-3 Expression des résultats :

On retient pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et on calcule la résistance (R) par la relation suivante :

$$R = \frac{F}{S}$$

Où : F : est la charge maximale (en KN).

S : est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carrée.

R : la résistance à la compression exprimée en MPa.



Figure II-6: presse de compression.



figure II-5: appareil traction par flexion.

CHAPITRE III

Résultats

Et Interprétation

III-1 Introduction :

Ce chapitre contient tous les résultats obtenus du programme, sous forme de tableaux et graphes ou toutes les propriétés des ciments étudiés seront analysées et interprétés.

Les propriétés ont été classées en deux catégories :

- les propriétés physiques ;
- les propriétés mécaniques.

III-2 Analyses chimiques des ciments utilisés :

La composition chimique des ciments utilisés dans notre travail expérimental a été déterminés au moyen de la méthode d'essai é « Fluorescence aux rayons x ».

Ces deux tableaux donnent la composition chimique et minéralogique des ciments retenus dans notre étude expérimentale.

III-3 Essai sur la pâte de ciment :

III-3-1 La consistance normalisée :

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes .la consistance dite « consistance normalisée » peut être déterminée par l'essai en utilisant un appareil s'appelle « Vicat ».

III-3-2 L'essai de prise :

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

Tableau III-3 : la consistance et début de prise et fin de prise.

Ciment	Consistance	Début et fin de prise			Surface spécifique g/ cm ²	L'ajout utilisé
	C (%)	P (mm)	Début h : min	Fin h : min		
CRS	23	7	2 :50	3 :40	3674	/
CRS _{10%L}	23	6	3 :10	3 :45	3653	Laitier
CRS _{20%L}	24	5.5	3 :23	4 :05	3280	Laitier
CRS _{30%L}	24	5.1	3 :40	4 :25	3240	Laitier
CRS _{50%L}	25	5.2	3.45	4.40	3225	Laitier
CRS _{70%L}	25	5.4	4.50	4.45	3240	Laitier

III-4 La résistance à la flexion et la compression de mortier :

III-4-1 Influence de milieu de conservation

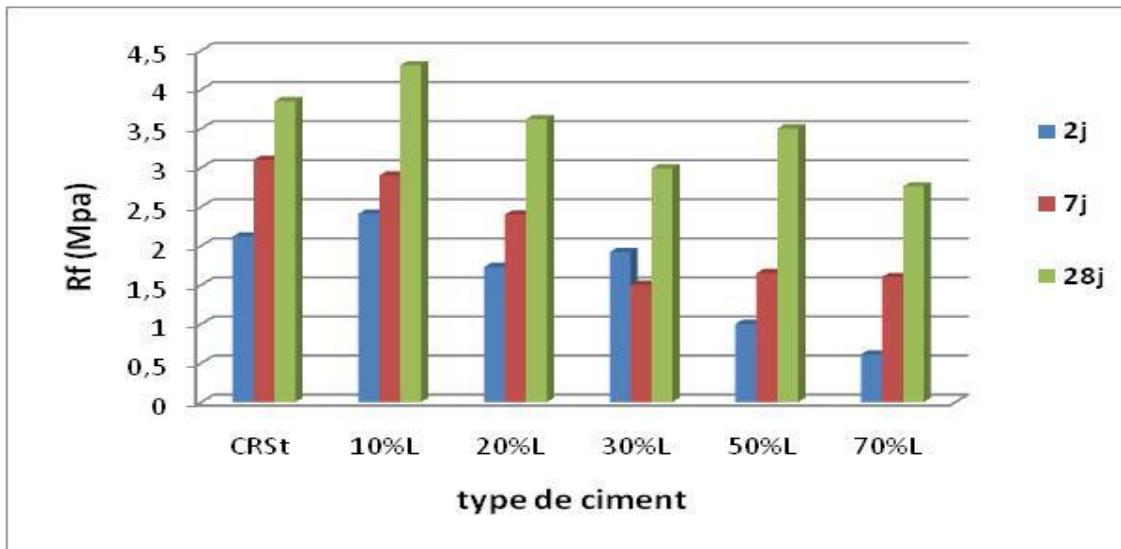


Figure III-1 : la résistance à la flexion conservation à l'air.

D'après les résultats, on remarque que le ciment de mortier de 10%L donne meilleurs résultats par rapport les autre types de ciments du mortier.

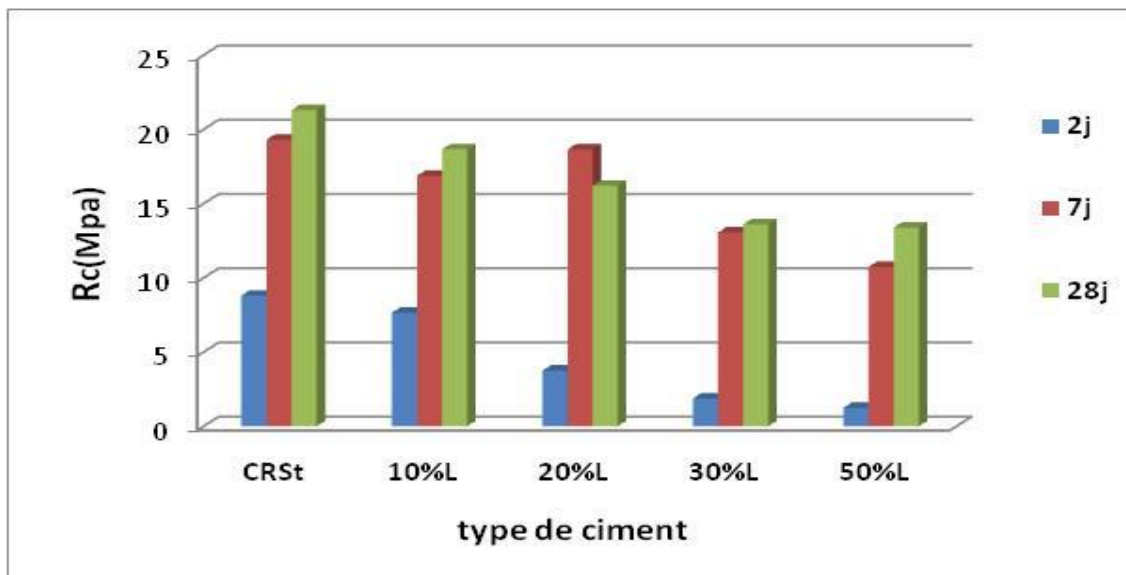


Figure III-2 : la résistance à la compression conservation à l'air.

On remarque que le ciment témoin CRSt montre les meilleures résultats par rapport aux autres types de ciments ce la est due processus d'hydratation lent qui conserve l'hydratation à court

terme jusqu'au 28j, on remarque une augmentation progressive de la résistance en fonction de l'âge.

III-4-2 Influence de la cure à 40°C :

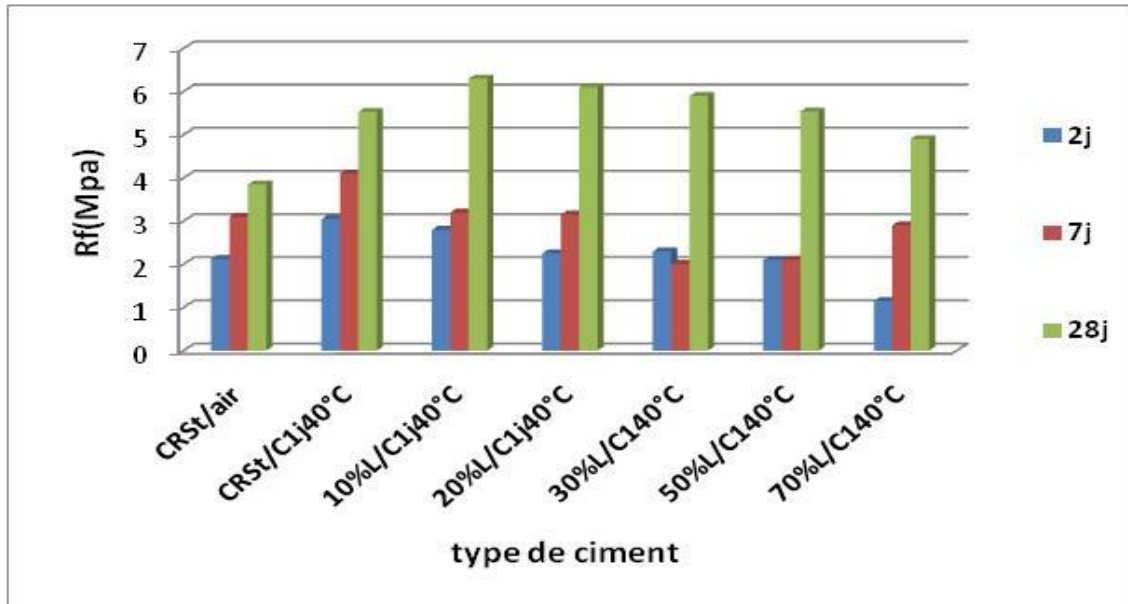


Figure III-3 : la résistance à la flexion conservation C1j à 40°C.

On remarque que le mortier de 10%L à 40°C pour la cure de 1j a donne les meilleurs résultats pour les trois échéances.

Le ciment témoin activé thermiquement montre une amélioration face au mortier de ciment conservé à l'air, on peut dire que l'activation thermique est efficace pour le ciment avec ou son ajout.

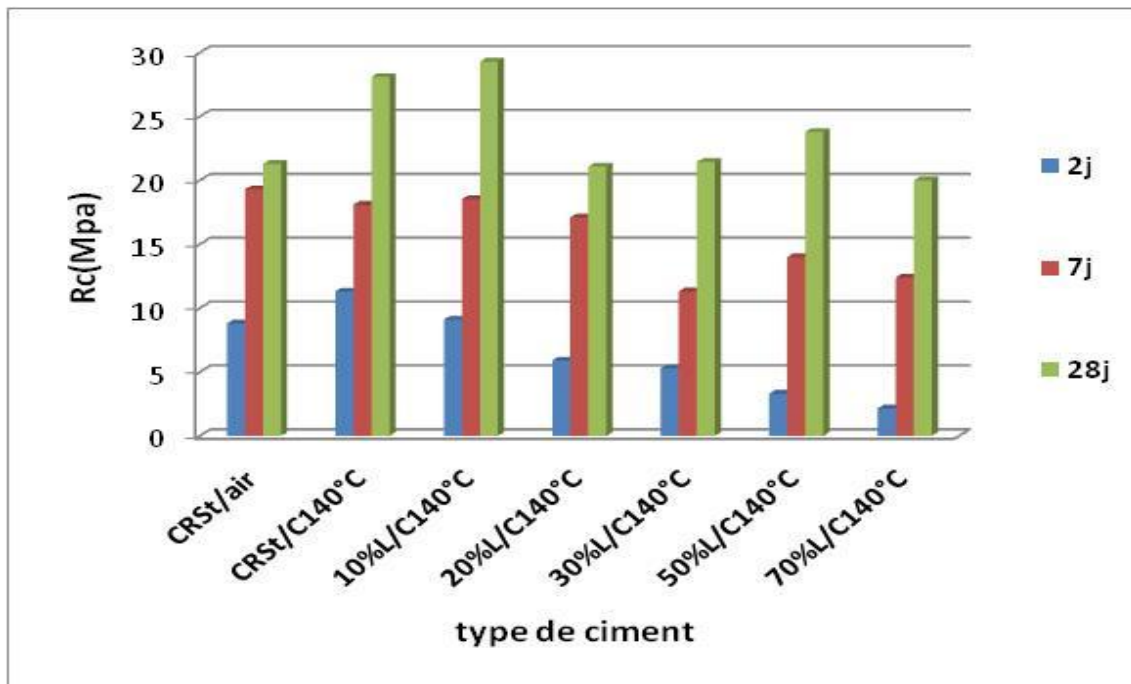


Figure III-4 : la résistance à la compression conservation C1j à 40°C.

On remarque que le mortier de 10%L à 40°C pour la cure de 1j a donne les meilleurs résultats pour les trois échéances.

Le ciment témoin activé thermiquement montre une amélioration face au mortier de ciment conservé à l'air, on peut dire que l'activation thermique est efficace pour le ciment avec ou son ajout.

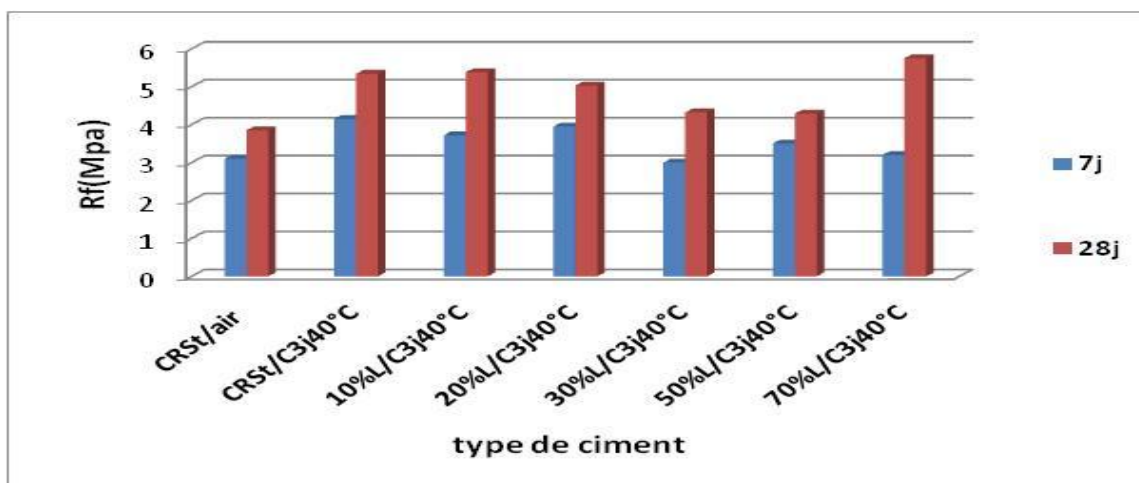


Figure III-5 : la résistance à la flexion conservation C3j à 40°C.

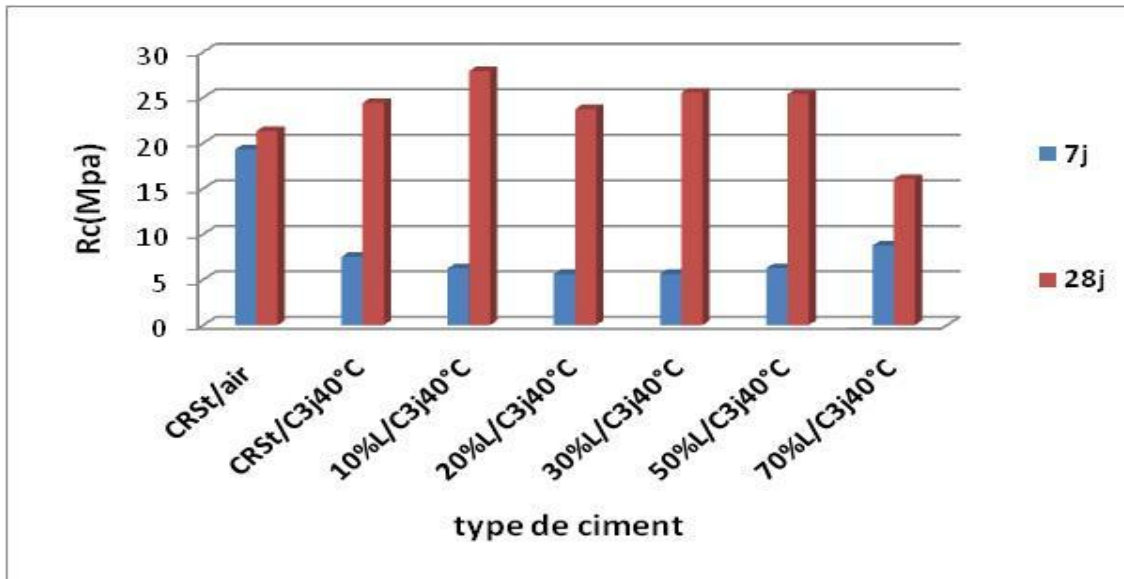


Figure III-6 : la résistance à la compression conservation C3j à 40°C.

On remarque que le CRSt/air donne des bons résultats.

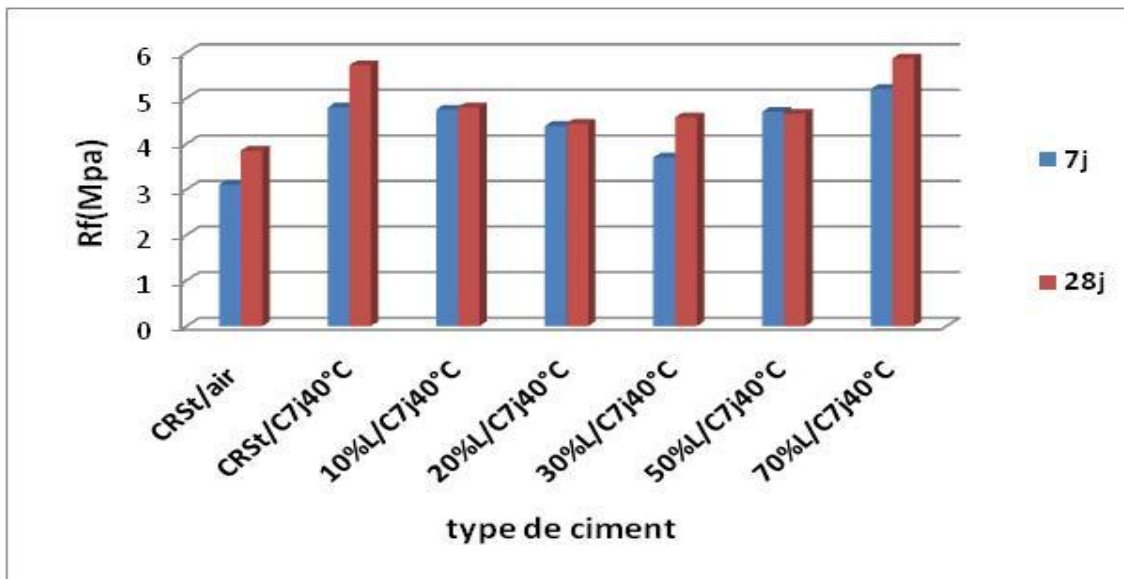


Figure III-7 : la résistance à la flexion conservation C7j à 40°C.

On remarque que CRS70%L donne des meilleurs résultats à 7j et 28j.

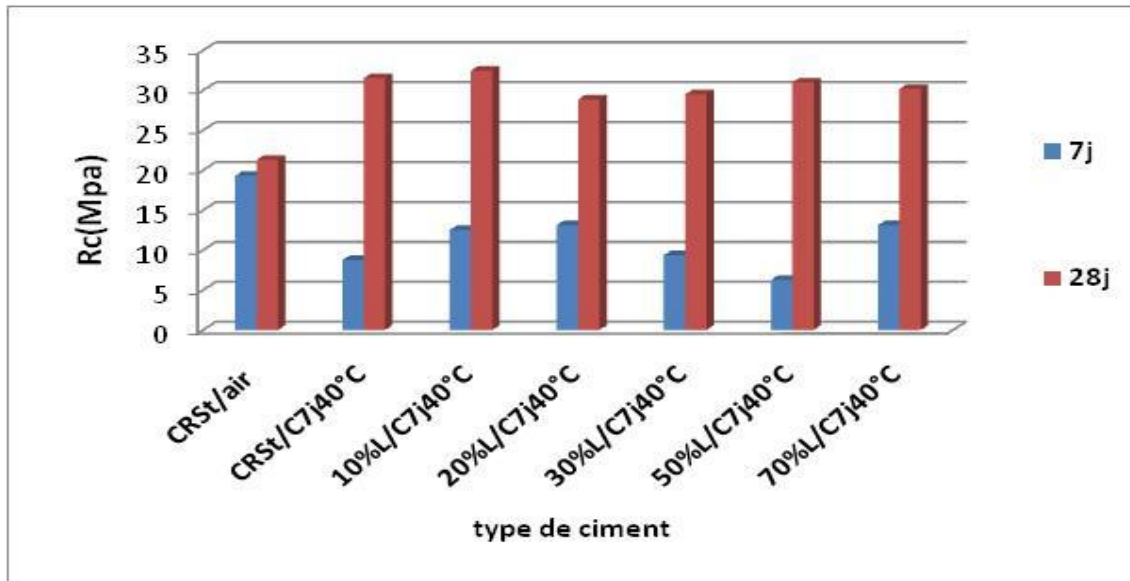


Figure III-8 : la résistance à la compression conservation C7j à 40°C.

On remarque que CRS10%L donne un bon résultat à 28j.

III-4-3 Influence de la cure à 60°C :

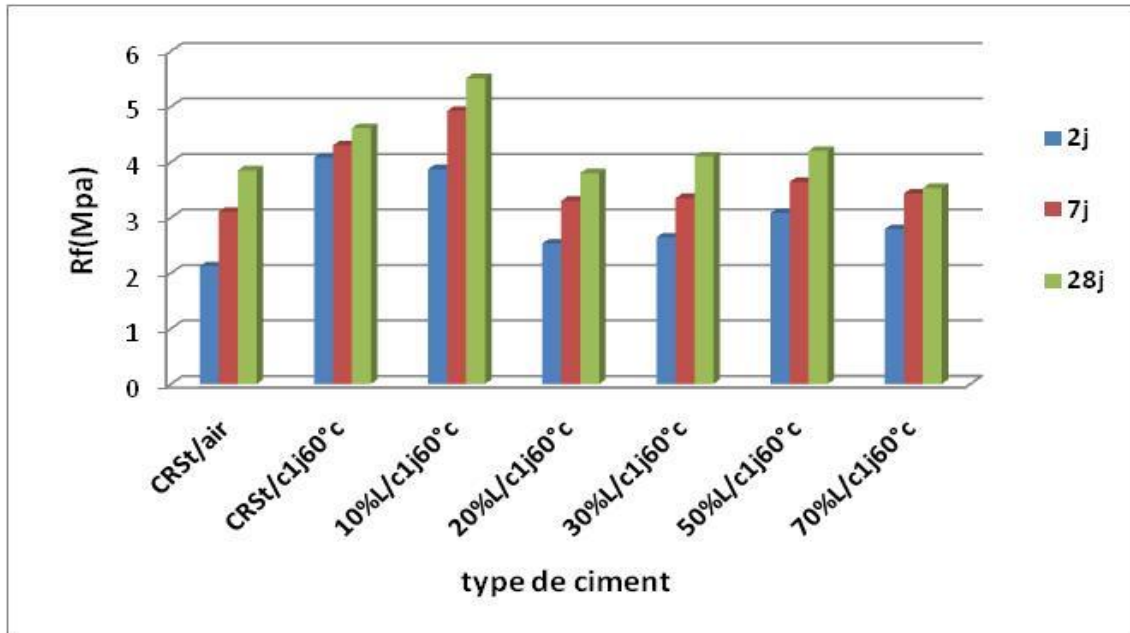


Figure III-9 : la résistance à la flexion conservation C1j à 60°C.

On remarque que le mortier de 10%L à 60°C pour la cure de 1j a donne les meilleurs résultats pour les trois échéances.

Le ciment témoin activé thermiquement montre une amélioration face au mortier de ciment conservé à l'air, on peut dire que l'activation thermique est efficace pour le ciment ou son ajout.

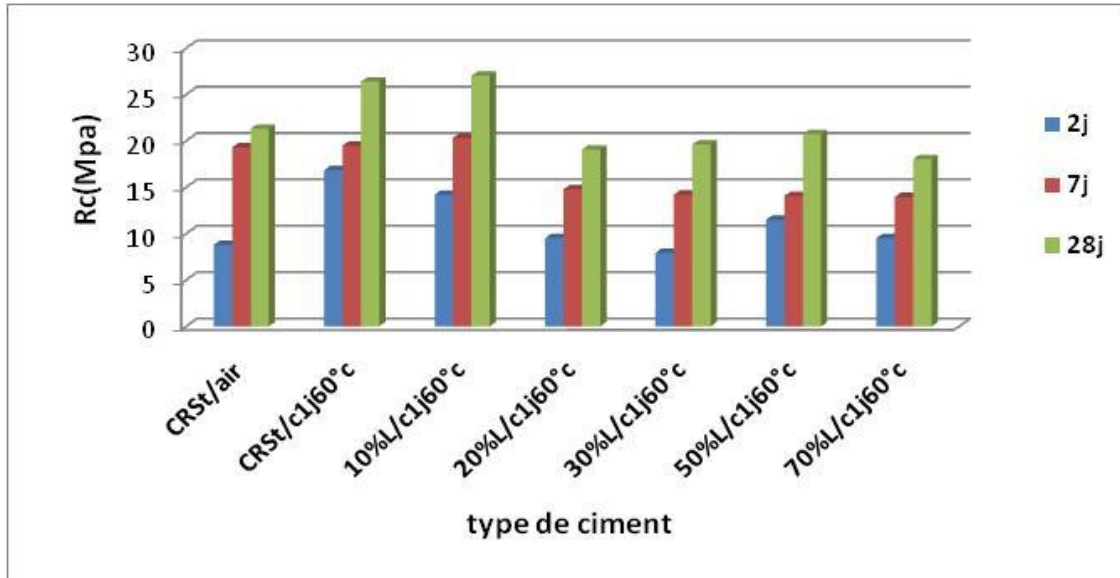


Figure III-10 : la résistance à la compression conservation C1j à 60°C.

On remarque que le mortier de 10%L à 60°C pour la cure de 1j a donne les meilleurs résultats pour les trois échéances.

Le ciment témoin activé thermiquement montre une amélioration face au mortier de ciment conservé à l'air, on peut dire que l'activation thermique est efficace pour le ciment avec ou son ajout.

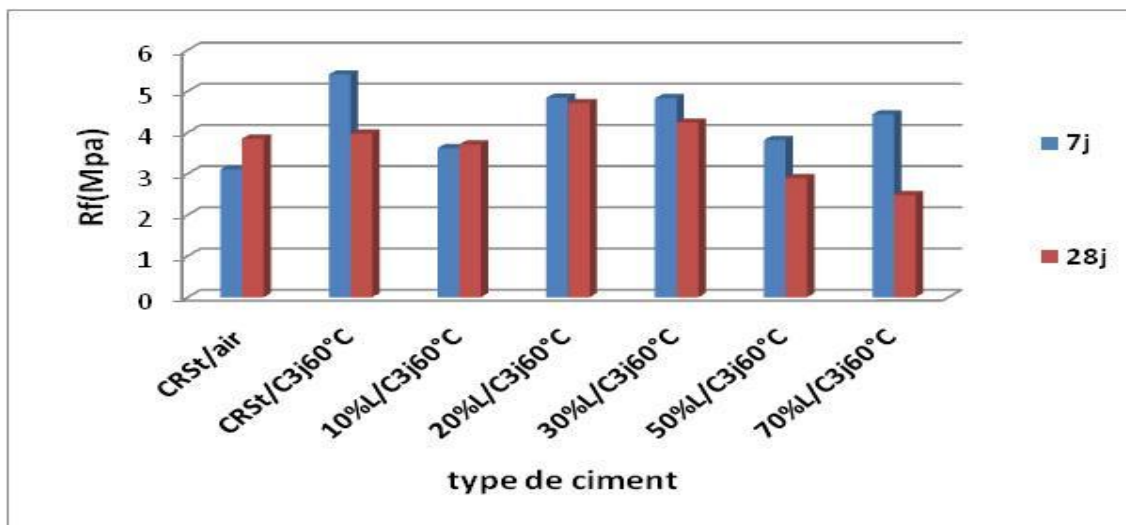


Figure III-11 : la résistance à la flexion conservation C3j à 60°C.

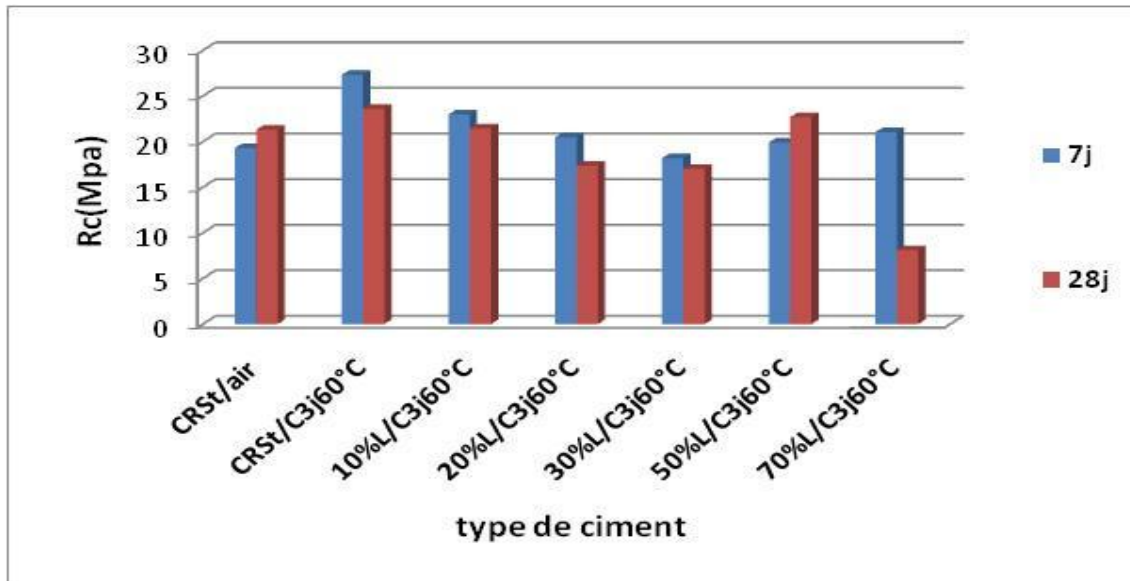


Figure III-12 : la résistance à la compression conservation C3j à 60°C.

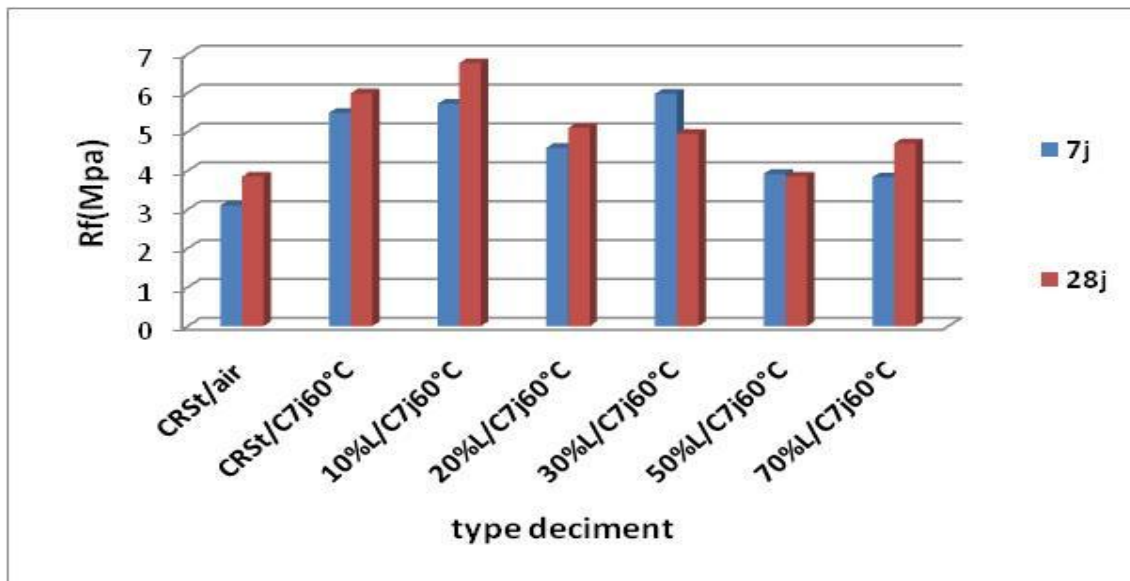


Figure III-13 : la résistance à la flexion conservation C7j à 60°C.

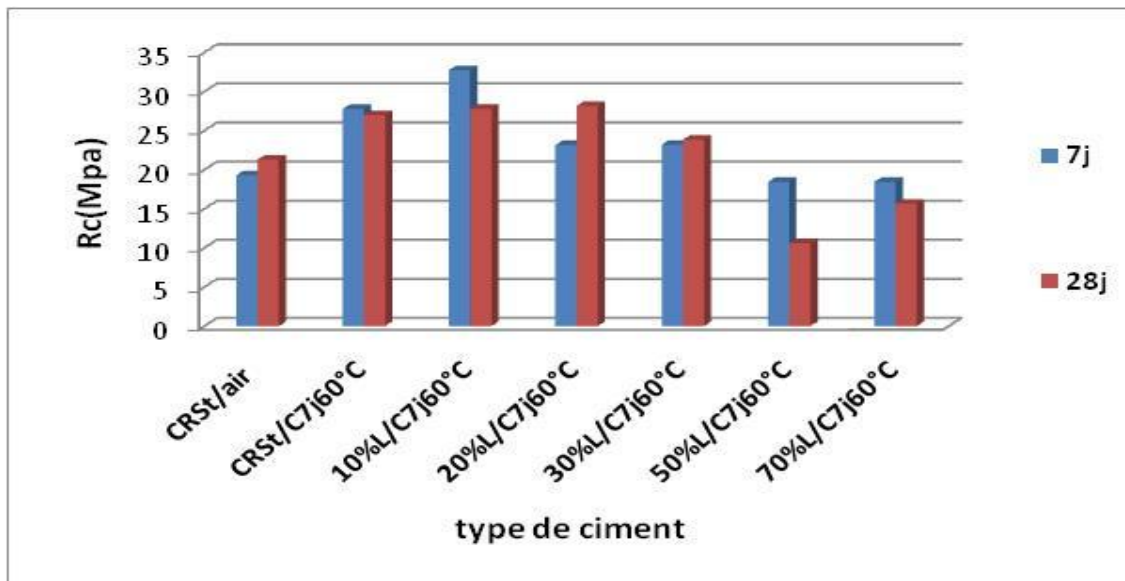


Figure III-14 : la résistance à la compression conservation C7j à 60°C.

On remarque que le mortier de 10%L à 60°C pour la cure de 7j a donne les meilleurs résultats pour les trois échéances.

III-4-4 Influence de la température de cure 40°

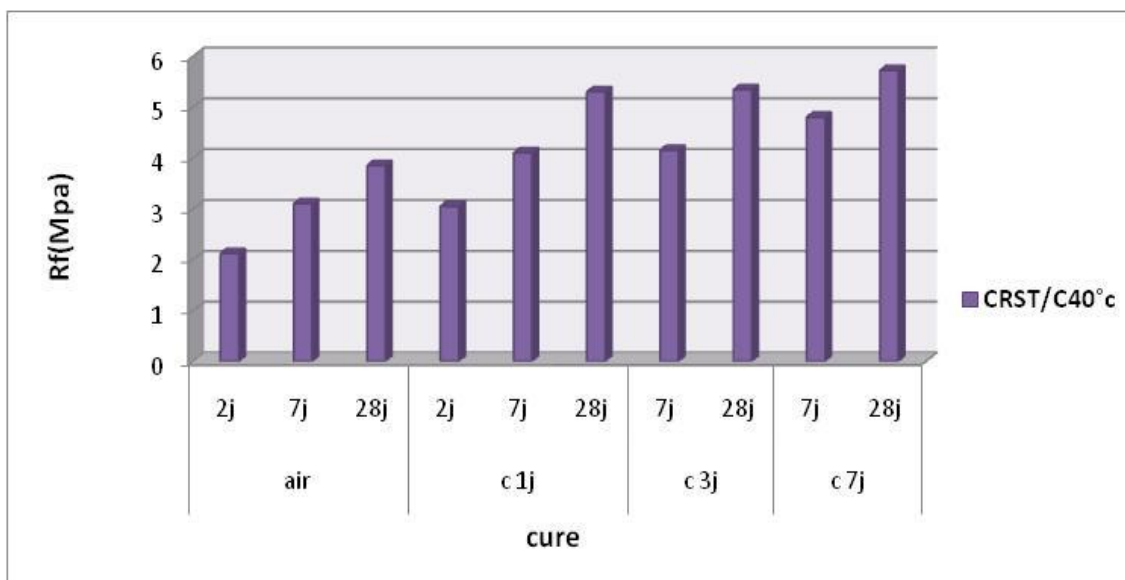


Figure III-15 : la résistance à la flexion CRSt à 40°C (air,C1J ,C3et C7J).

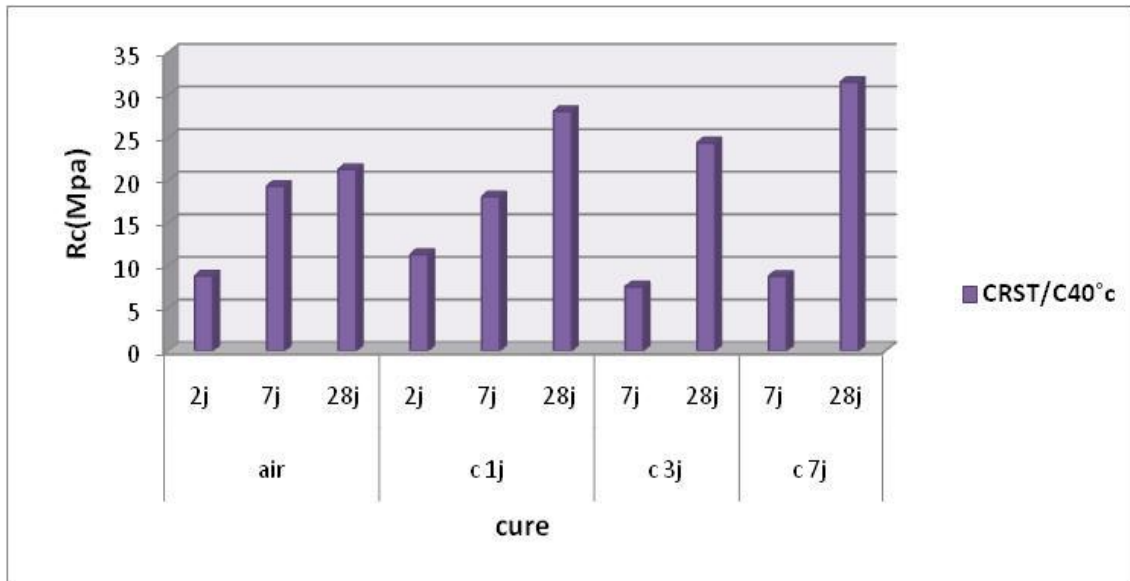


Figure III-16 : la résistance à la compression CRSt à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque pour la résistance que ce soit à la flexion ou à la compression, que l'activation thermique on générale, elle est efficace pour les ciments témoin.

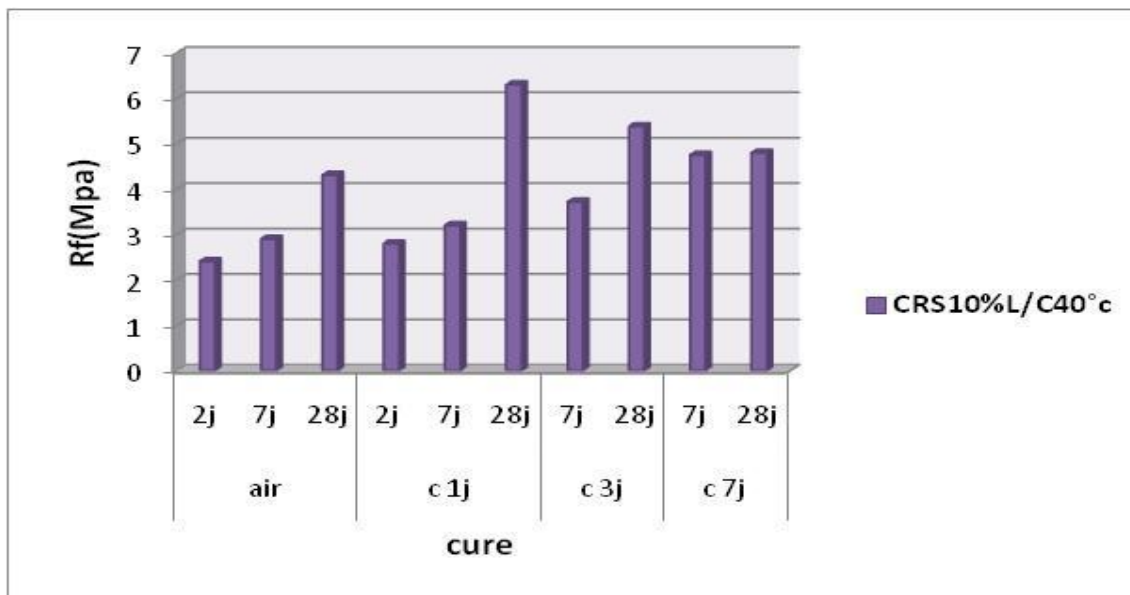


Figure III-17 : la résistance à la flexion CRS10%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque que dans la cure de 1j la résistance à 28j pus élevé par rapport à tous les ciments.

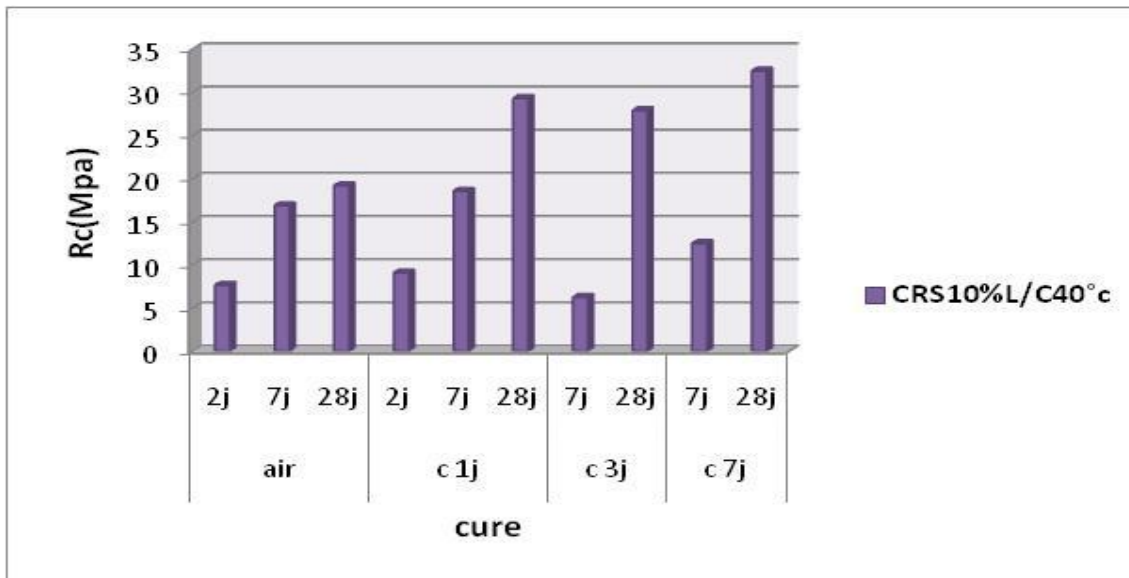


Figure III-18 : la résistance à la compression CRS10%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque qu'il a une augmentation progressive de la résistance (flexion/compression).

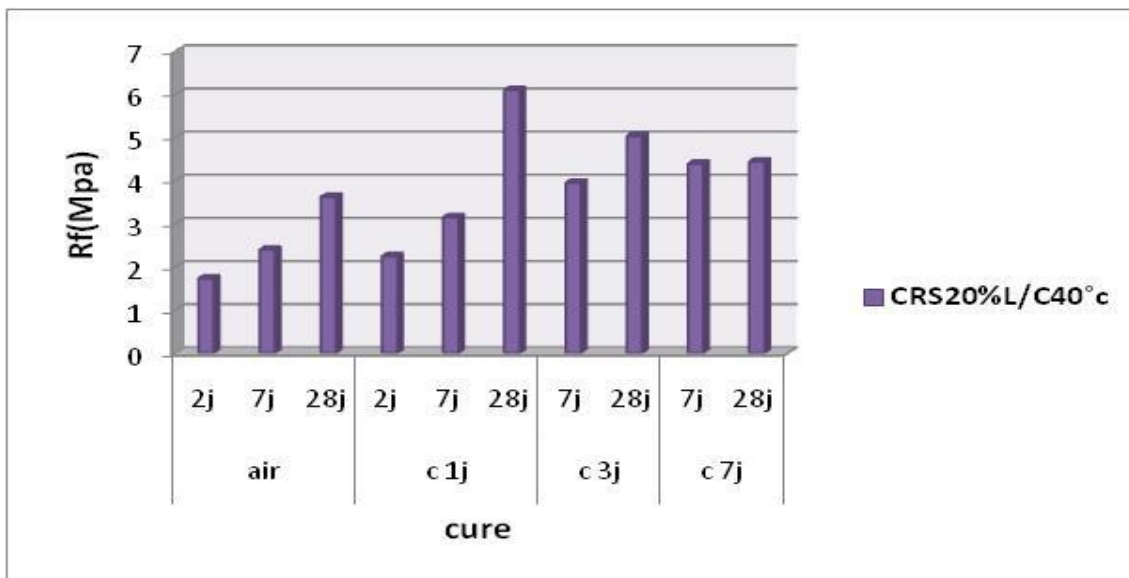


Figure III-19 : la résistance à la flexion CRS20%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 1j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

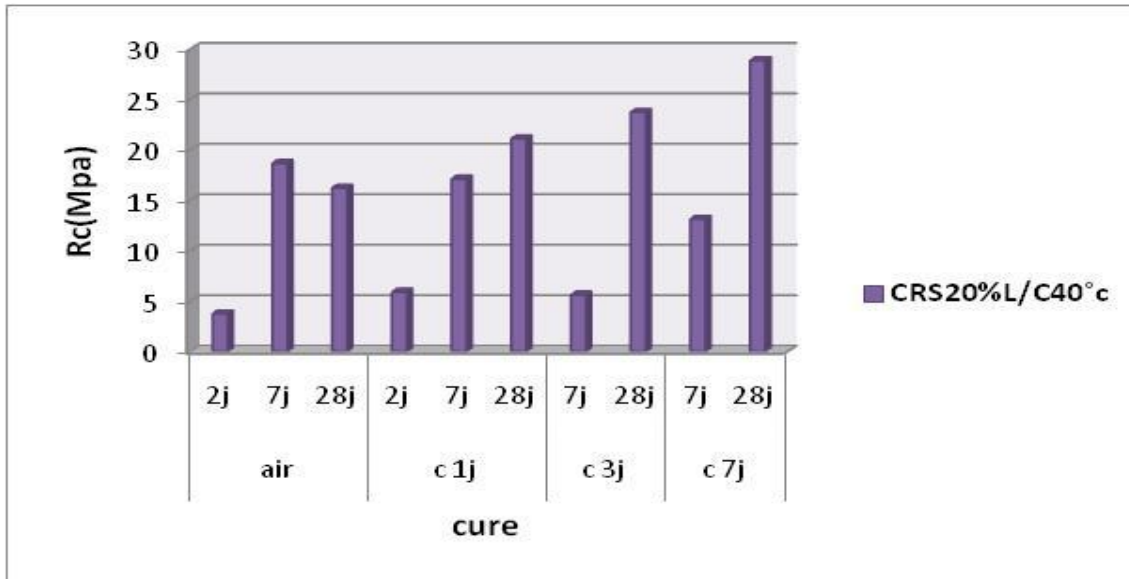


Figure III-20 : la résistance à la compression CRS20%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 7j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

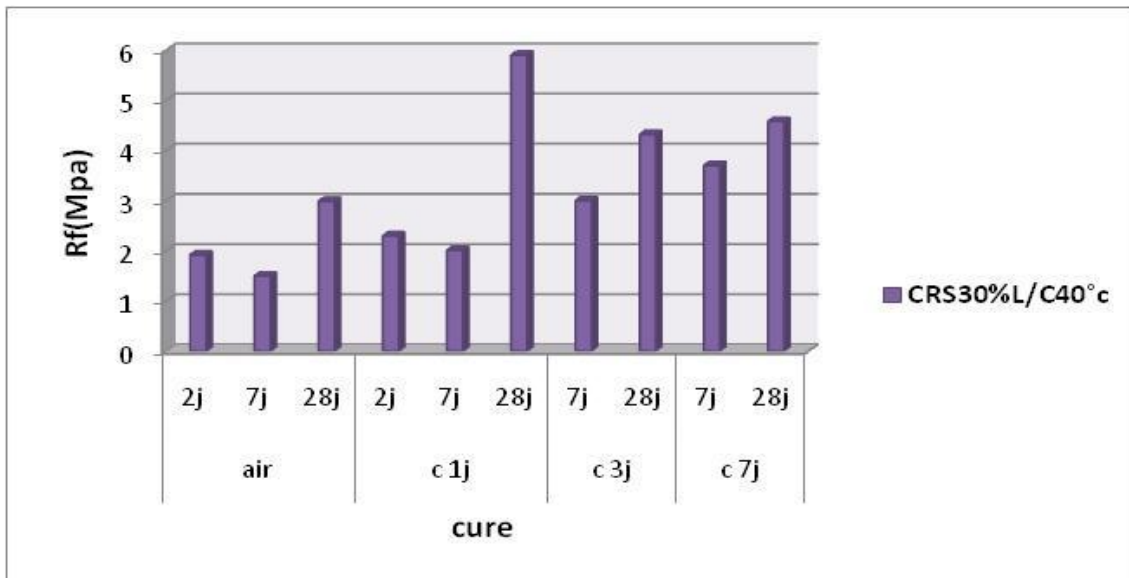


Figure III-21 : la résistance à la flexion CRS30%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 1j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

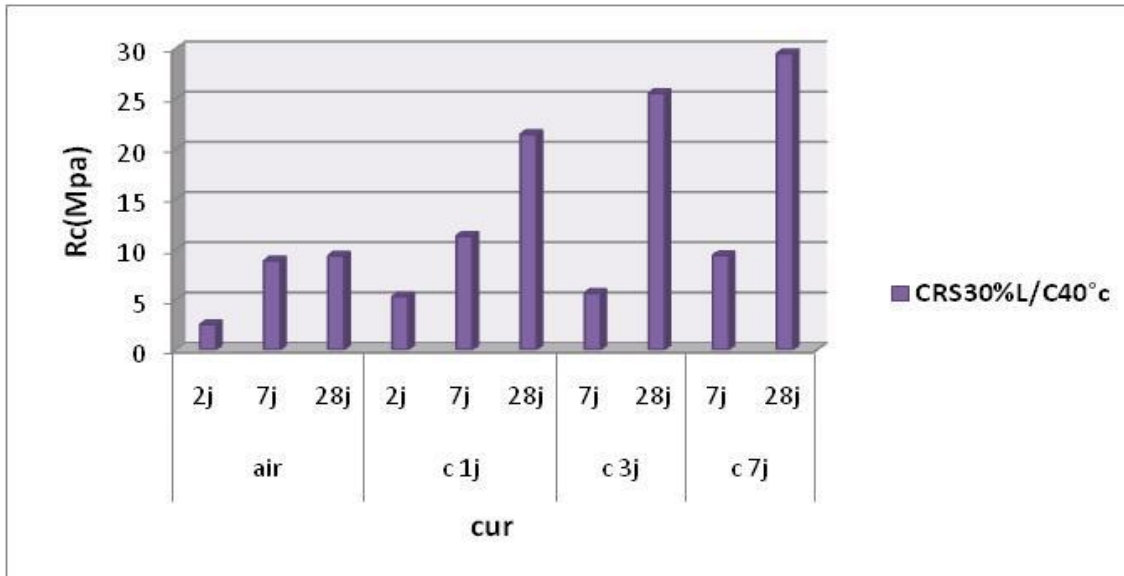


Figure III-22 : la résistance à la compression CRS30%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 7j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

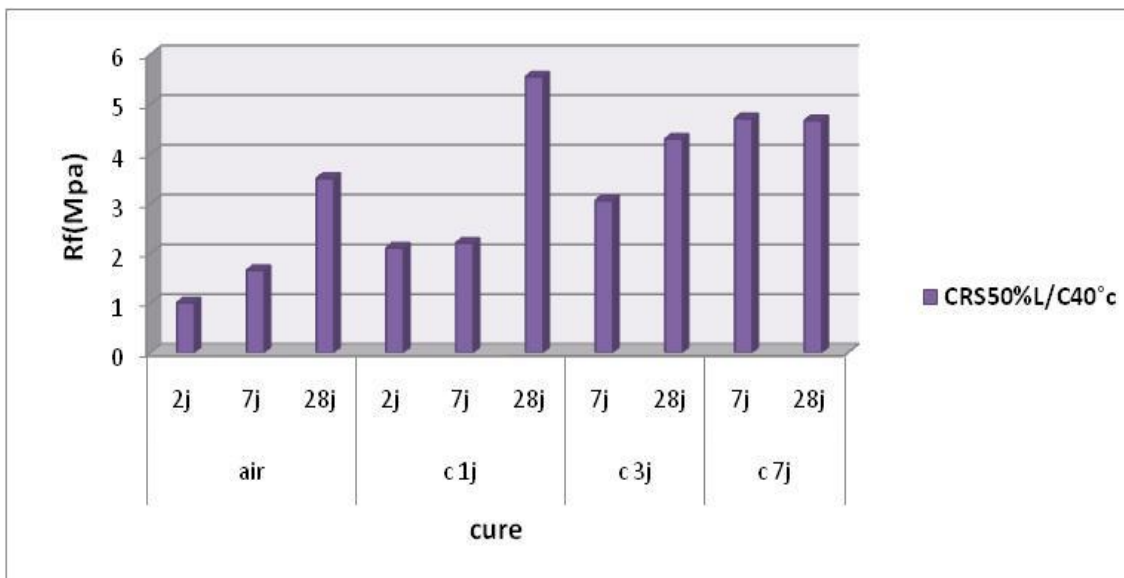


Figure III-23 : la résistance à la flexion CRS50%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 1j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

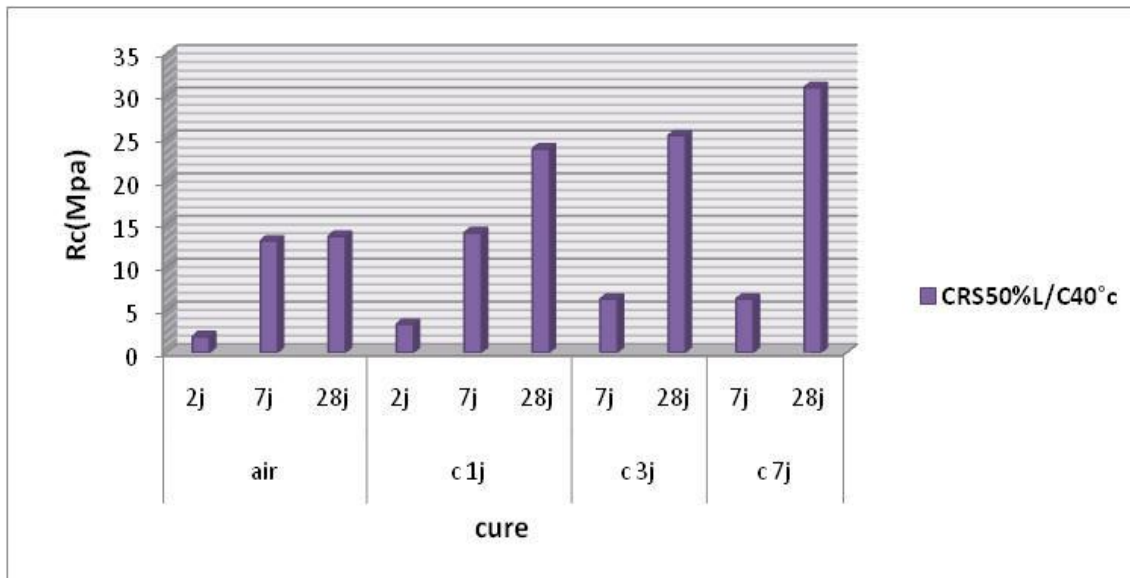


Figure III-24 : la résistance à la compression CRS50%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 7j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

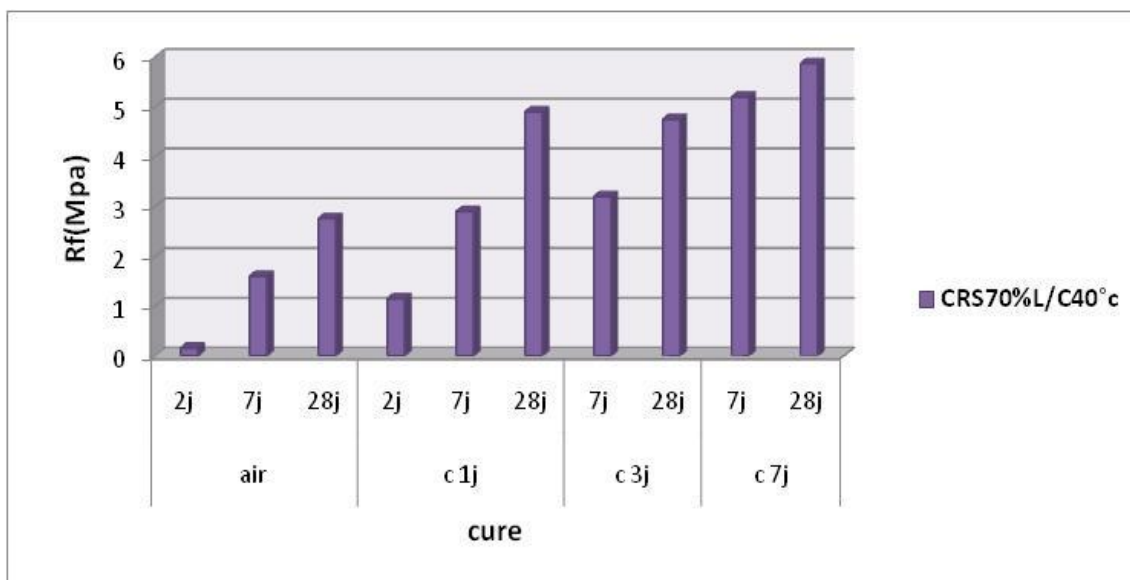


Figure III-25 : la résistance à la flexion CRS70%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 7j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

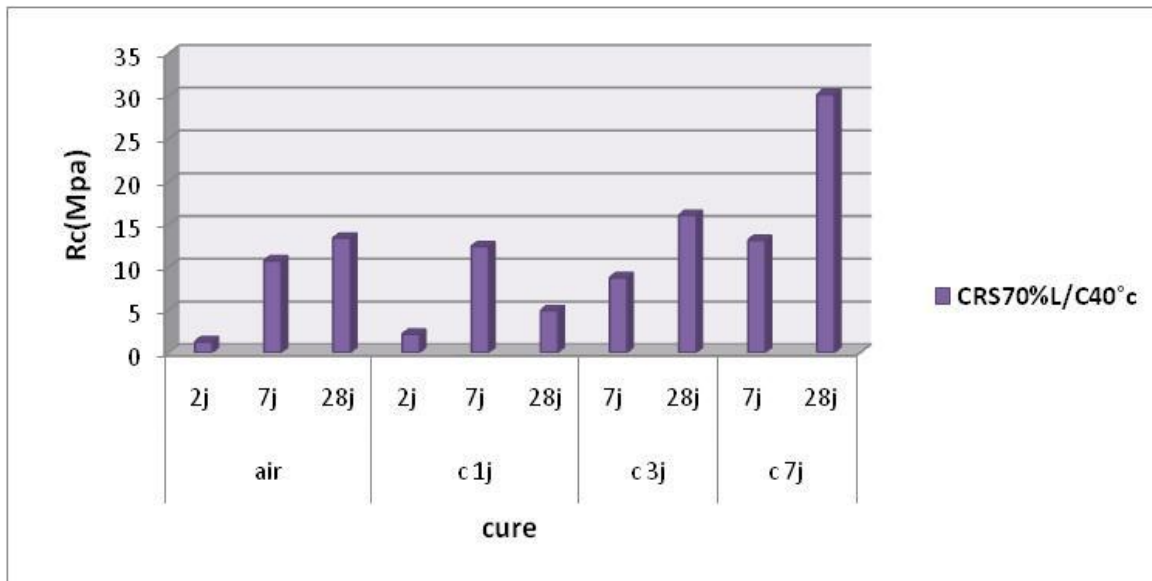


Figure III-26 : la résistance à la compression CRS70%L à 40°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque dans la cure 7j la résistance à 28j plus élevé par rapport à tous les ciments.

III-4-5 Influence de la température de cure 60°C

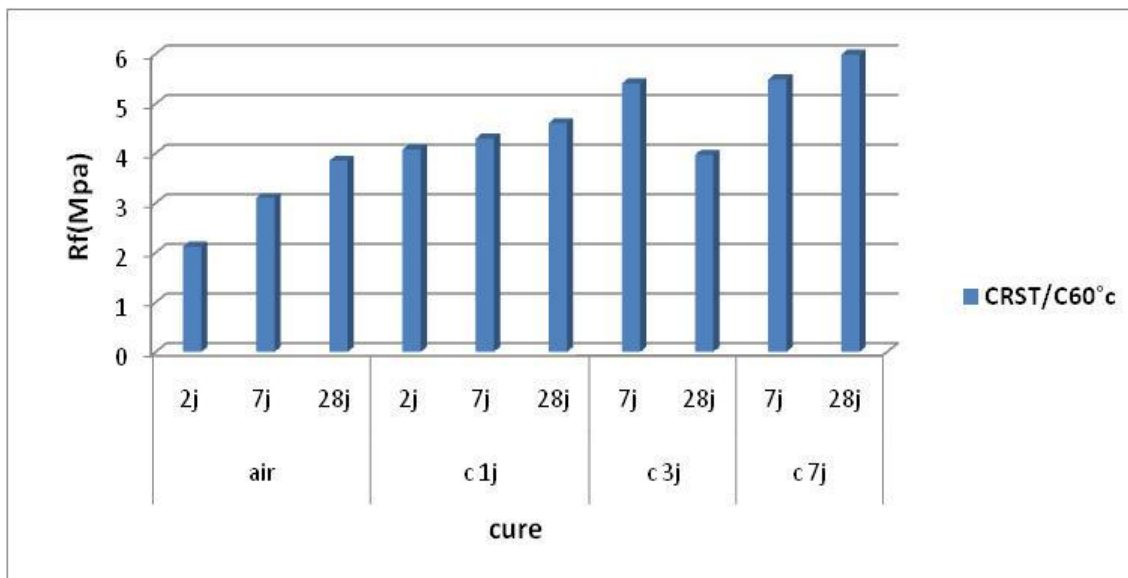


Figure III-27 : la résistance à la flexion CRSt à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque que l'activation thermique on géniale, elle est efficace pour les ciments témoins.

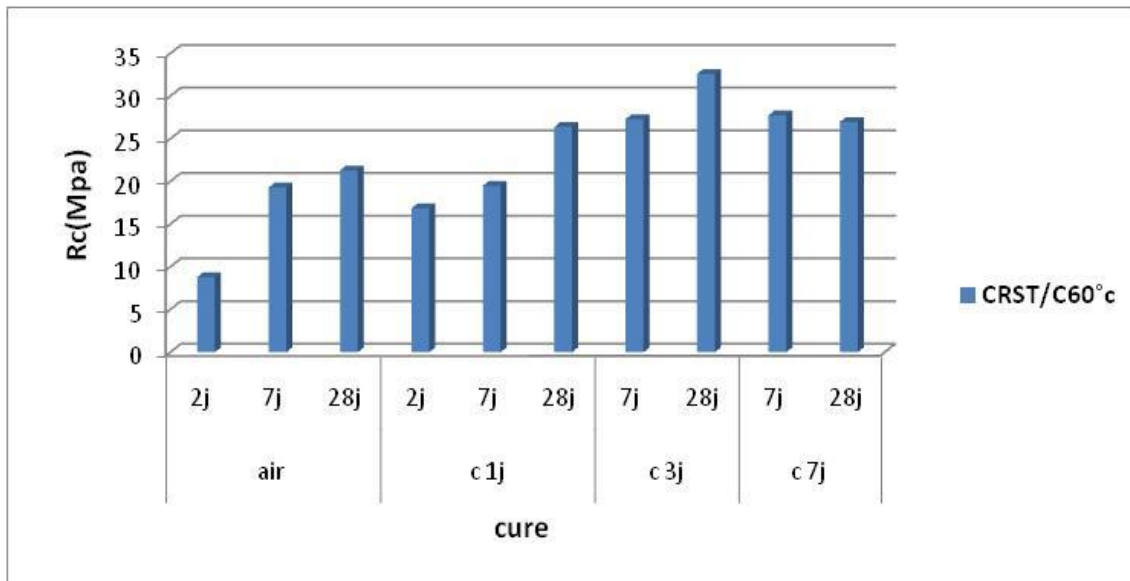


Figure III-28 : la résistance à la compression CRSt à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

On remarque que l'activation thermique on géniale, elle est efficace pour les ciments témoins.

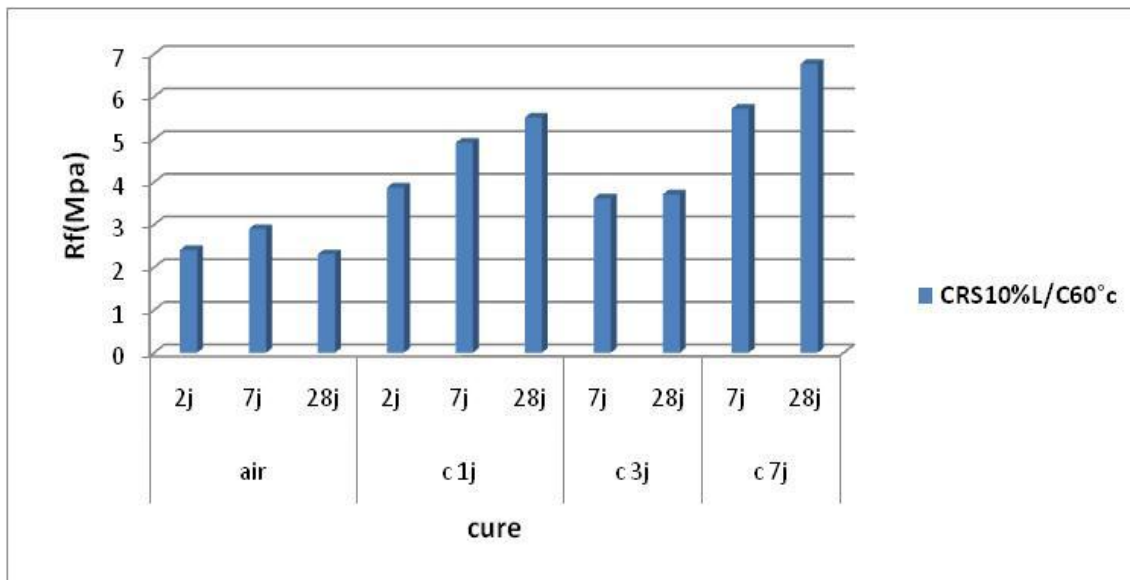


Figure III-29 : la résistance à la flexion CRS10%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

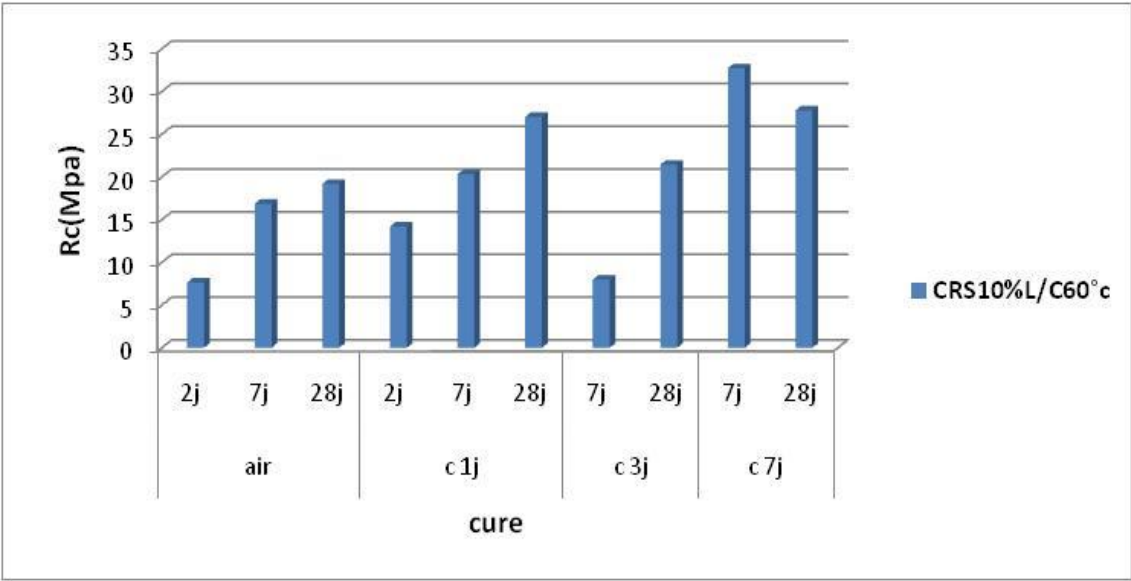


Figure III-30 : la résistance à la compression CRS10%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

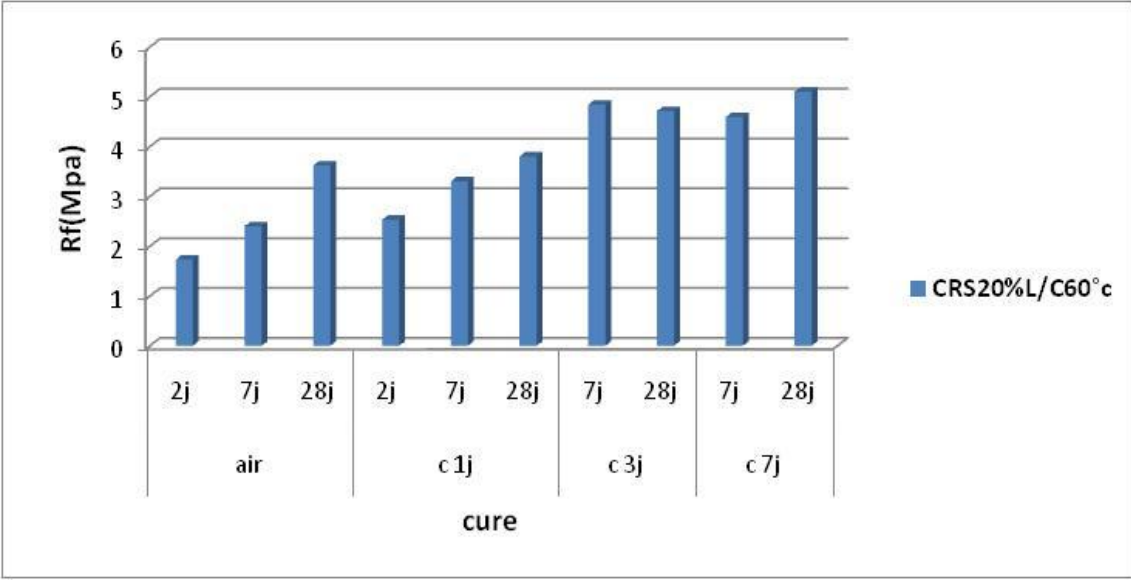


Figure III-31 : la résistance à la flexion CRS20%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

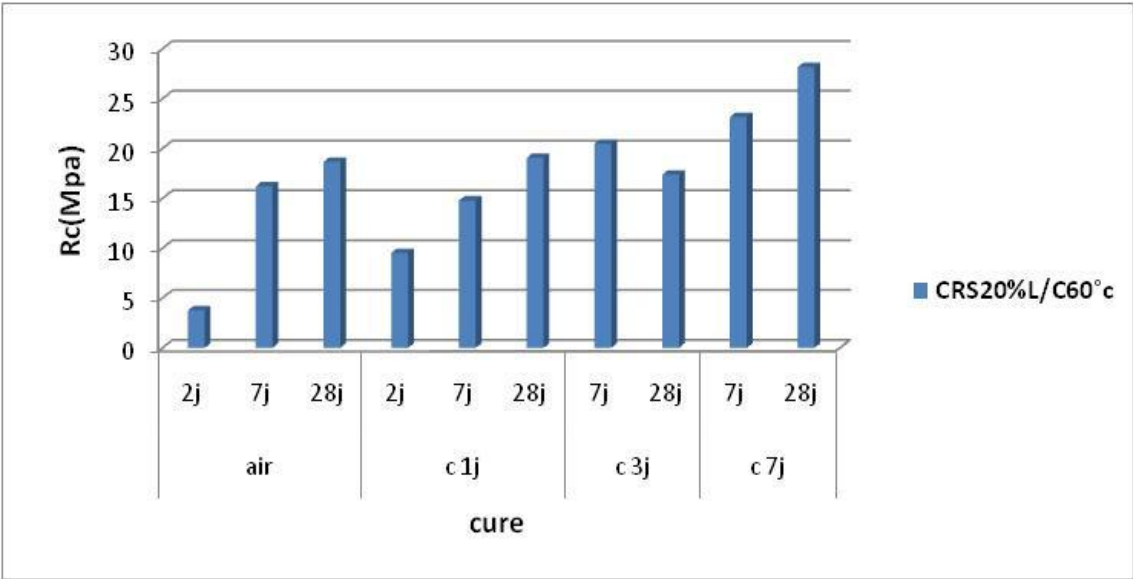


Figure III-32 : la résistance à la compression CRS20%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

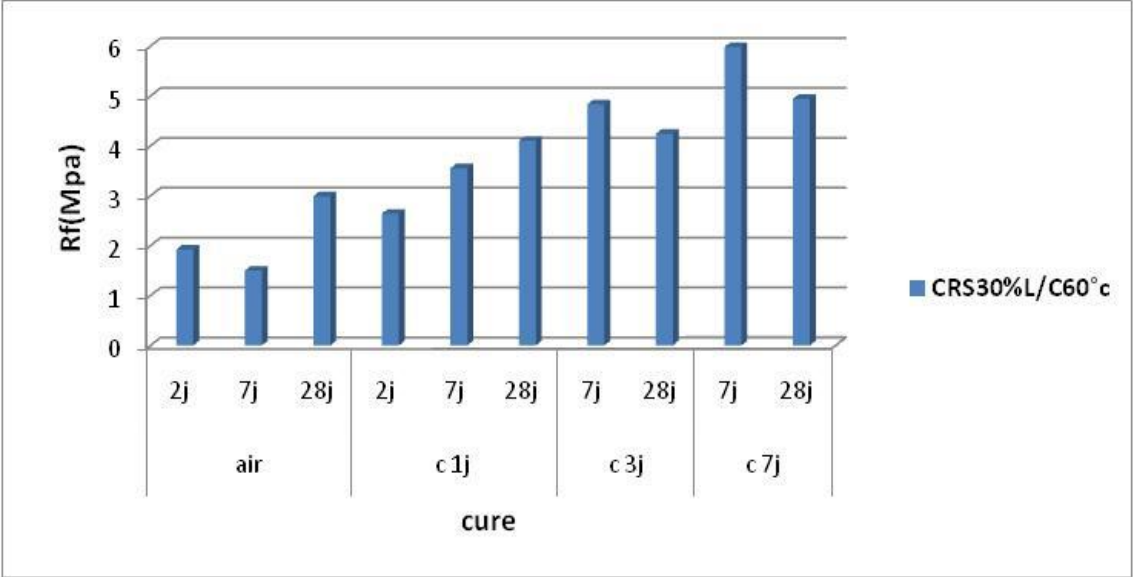


Figure III-33 : la résistance à la flexion CRS30%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

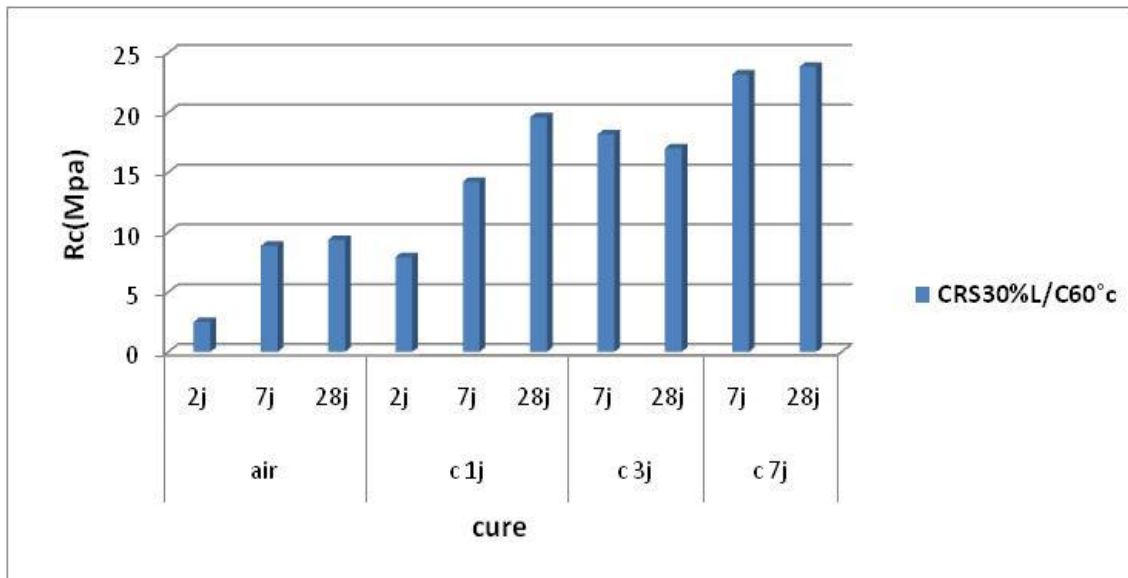


Figure III-34 : la résistance à la compression CRS30%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

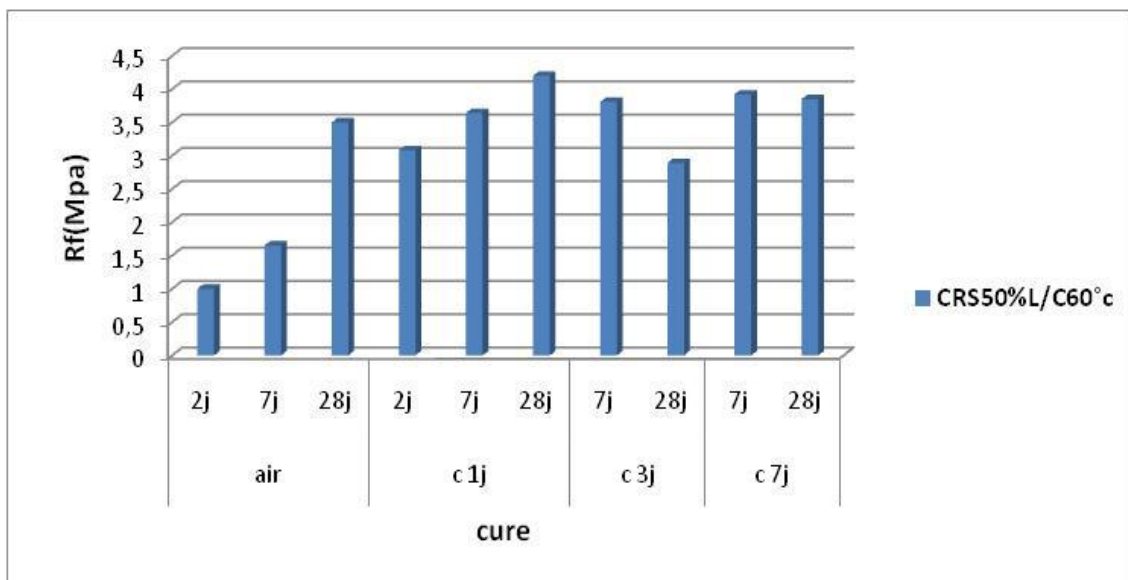


Figure III-35 : la résistance à la flexion CRS50%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

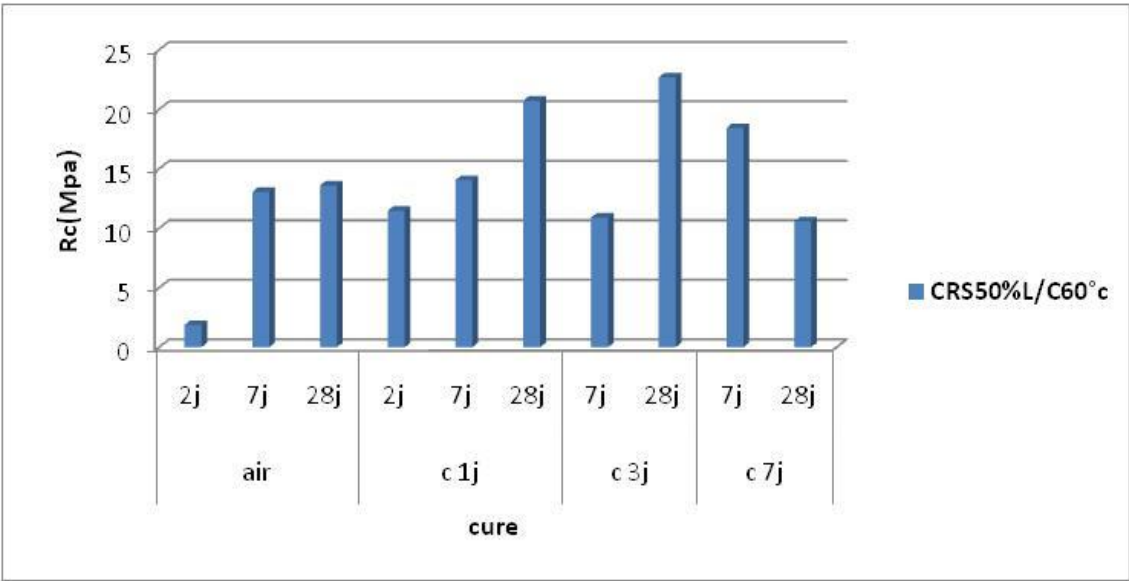


Figure III-36 : la résistance à la compression CRS50%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

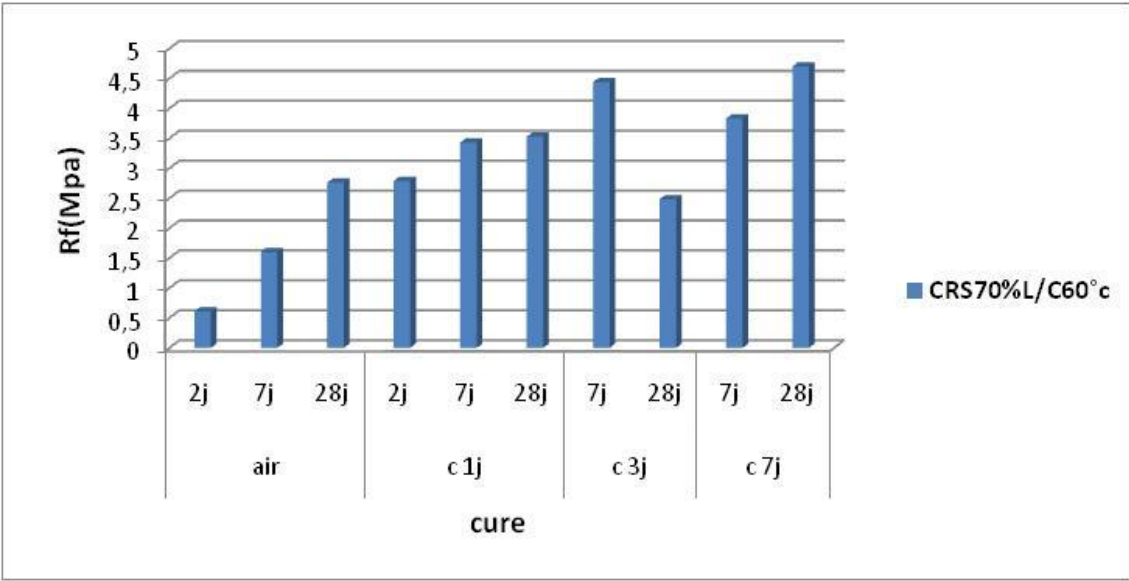


Figure III-37 : la résistance à la flexion CRS70%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

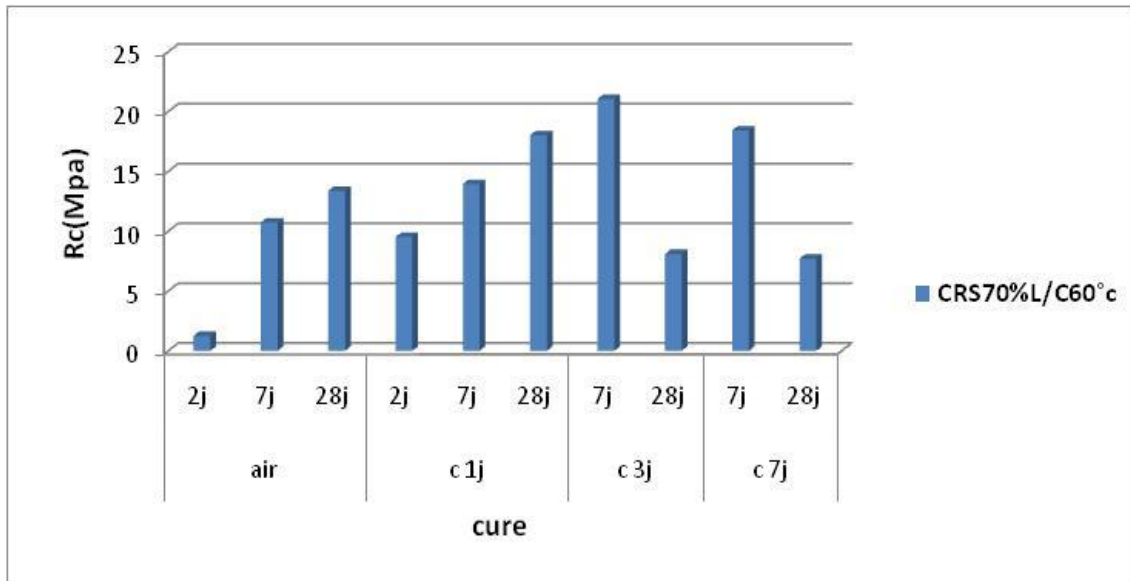


Figure III-38 : la résistance à la compression CRS70%L à 60°C (air, C1J, C3Jet C7J).

III-4-6 Evolution de la résistance à la flexion et à la compression du mortier C1, C3, C7 et l'air en fonction de régime de cure

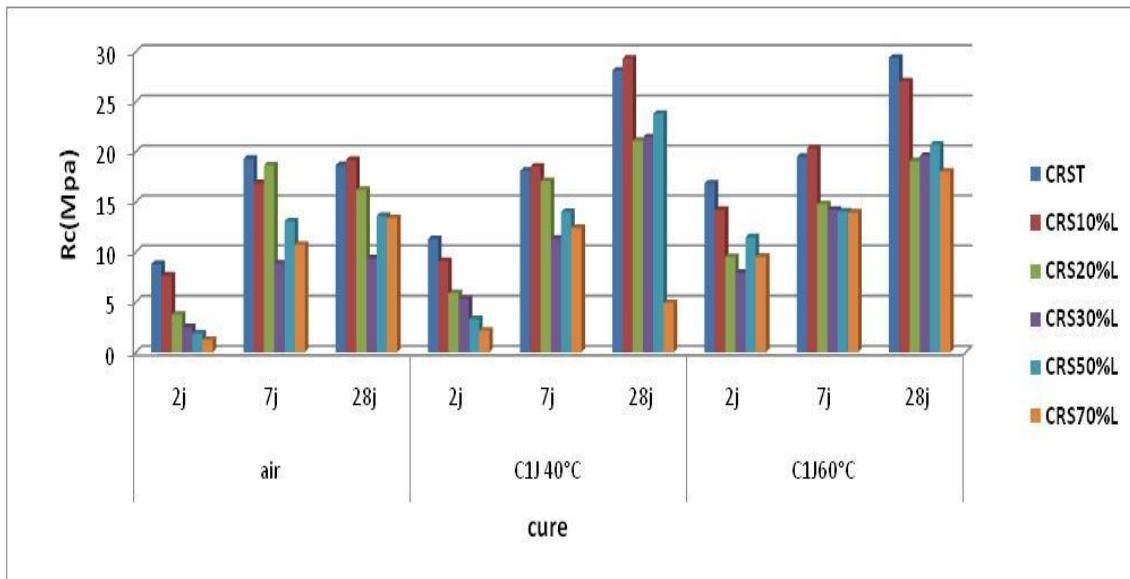


Figure III-39 : Comparaison ente la résistance à la compression du mortier à température 40°C et 60°C et à C1j

On remarque que l'activation à l'âge de 28j montre meilleure résultat.

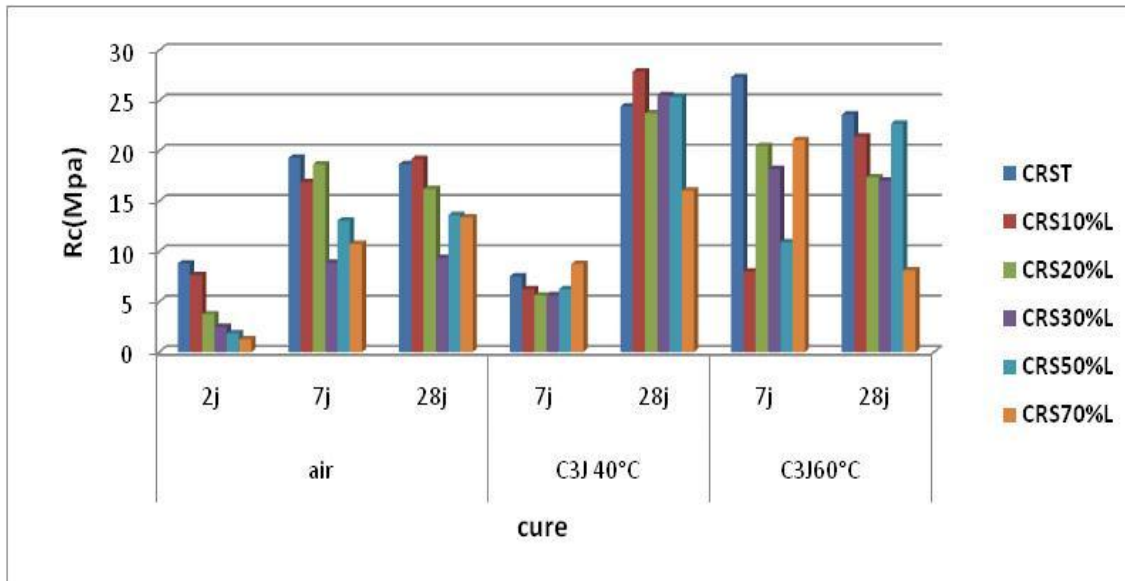


Figure III-40 : Comparaison ente la résistance à la compression du mortier à température 40°C et 60°C et à C3j.

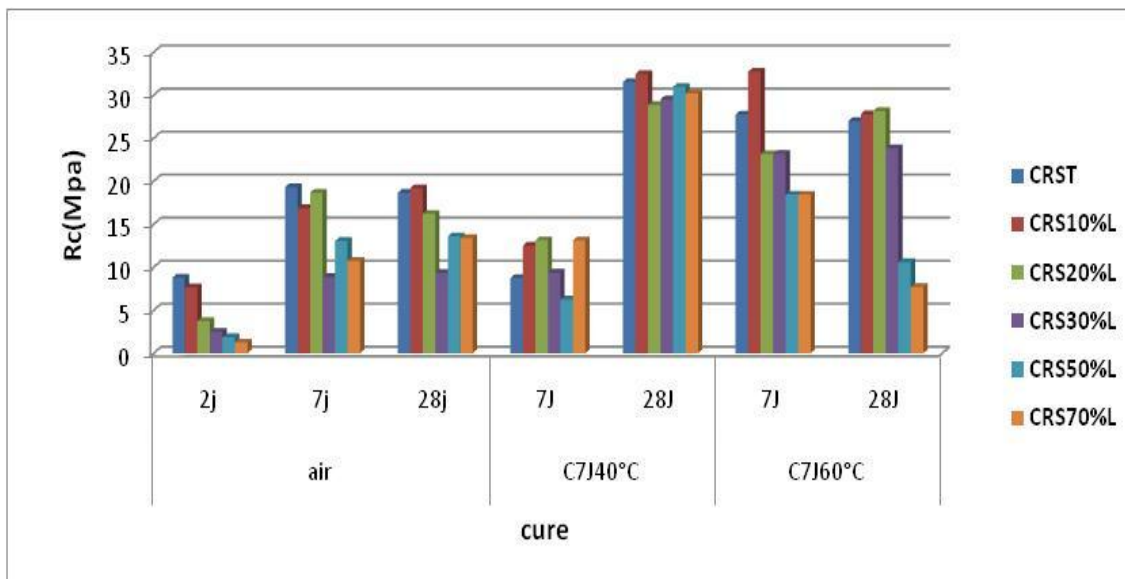


Figure III-41 : Comparaison ente la résistance à la compression du mortier à température 40°C et 60°C et à C7j.

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche traite à la fois l'effet de l'activation thermique et la cure sur les propriétés physico mécanique des mortiers.

D'après les résultats obtenus, il apparait clairement la cure et l'activation thermiques sur des ciments à ajout surtout améliore ces propriétés, ainsi la cure prolongée permet de plus d'augmenter ces caractéristiques, l'effet combiné de la température et la cure provoque :

Accélération de durcissement (ciment +laitier) pendant la période de durcissement initial (à court terme), cela s'explique par le fait que la réaction chimique accélérée, ce qui veut dire que la cinétique d'hydratation du ciment avec ajout laitier devient de plus en plus rapide (formation élevés des cristaux de CSH : élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte de ciment confectionné).

L'évolution de résistance à la compression en fonction du taux de substitution du laitier une diminution systématique de la résistance à la compression à l'égard du taux de remplacement du laitier particulièrement aux jeunes âge ce comportement est exprimé par des courbes décroissantes en fonction du taux de remplacement l'influence positive de laitier n'est pas remarquée devant les premiers jours car l'hydratation de laitier est lente .

L'élévation de la température de cure a pour effet d'augmenter la résistance à la compression du ciment au laitier au jeune âge, une température optimale nécessaire au développement de la résistance au trouvée au voisinage de 40°C. Cette mesure permet aux constructeurs de choisir une température adéquate pour un bétonnage favorisant un développement souhaitable des résistances.

L'effet combiné de ces types améliore considérablement les propriétés mécaniques et physique des mortiers, ce qui d'ailleurs confirmé d'après les résultats obtenus.

BIBLIOGRAPHIE

- [01]- **BARRON J. SAUTEREY R.** Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris. P559.
- [02]- **CAMILLE DEFOSSE**, Chimie du ciment, valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruvelles, site "CHIM 315 Partie 3 2004".
- [03]- **L. PLISKIN** : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.
- [04]- **Kiran Pokkuluri**« Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectricproperties of Portland cementconcrete in the lowmicrowavefrequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [5]- **M. Regourd, H. Hornain**, « Applications de la microscopie électronique à balayage »Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [6]- **E. Guillon**, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l’influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [7]- **R. Gané**« Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [8]- **Kiran Pokkuluri**« Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectricproperties of Portland cementconcrete in the lowmicrowavefrequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [9]- **Bijen, J. 1996.** *Blast furnaceslag*. Betonprisma, The Netherlands, 62 p.
- [10]- **M Venuat**– La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. –277p-1989.
- [11]- **R. SERSALE**, “Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI- 17ème Congrè International de la chimie des ciments - Volume 1- Partis 1980.

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

[13]- **P.C. AITCIN, C., F. Autefage, A. carles-Macgreues., A. Vaquier.**, « comparativestudy of the cementitious of différent flyashe », pp 91-114 - 1994.

Résumé :

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

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

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout laitier dans le ciment.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout laitier : [0%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70%].

Dans cette étude, nous avons varié le pourcentage de l'ajout laitier dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par laitier) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout laitier et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

Mots clé : laitier, la cure, activation thermique, résistance, ciment.

ملخص:

تشكل الإضافات حاليًا جزءًا من أحدث التطورات في إنتاج الاسمنت، لأن استخدامها توفر تحسينًا للخصائص الميكانيكية للمواد التي تستخدم المواد الخام (الملاط). ومن ناحية أخرى، تهدف استخدامها إلى الحد من استهلاك الكلنكر عن طريق المساهمة بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشاكل المتصلة بالبيئة.

ويفحص هذا العمل التجريبي مزايا وإمكانية الاستبدال الجزئي للكلنكر عن طريق إضافته خبث الأفران في الاسمنت.

هذه الدراسة التجريبية تتكون من إعداد الاسمنت مع إضافته المعادن عن طريق استبدال نسبه معينه من الكلنكر مع إضافته خبث الأفران : [0% ، 10% ، 20% ، 30% ، 50% ، 70%].

وفي هذه الدراسة، تبيننا النسبة المثوية لإضافة خبث الأفران في الاسمنت بواسطة طريقه الاستبدال (الاستعاضة الجزئية عن الكلنكر بالخبث) من أجل دراسة أثره علي الخواص الفيزيائية-الكيميائية للاسمنت المصنوعة أضافه المعادن والسلوك الميكانيكي للملاط.

واستنادا إلى النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها، من الواضح إن كميته خبث الأفران المضافة والتراكيب الكيميائية للاسمنت هي المعالم الرئيسية التي تؤثر علي تباين المقاومة الميكانيكية (الانحناء والضغط) على الملاط الذي تم اختياره.

الكلمات المفتاحية: خبث الأفران. العلاج. التفعيل الحراري. المقاومة. الاسمنت

Abstract:

The supplementary cementation materials are currently part of the latest developments in the production of cement, resulting in a significant improvement to the mechanical performances of cementation materials (mortar). On the other hand, their uses aim to reduce the consumption of clinker, by contributing in a simple and economical way to solve the problems related to the environment.

This experimental work examines the advantages and the possibility of partial substitution of clinker by additions slag in cement.

This experimental study consists of preparing a cement with mineral addition by replacing a certain percentage of clinker with the addition of slag: [0%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70%].

In this study, we varied the percentage of the addition of slag in cement by the method of substitution (partial replacement of clinker by Slag) in order to study its effect on the physico-chemical properties of cement manufactured with The mineral addition and the mechanical behavior of the mortar.

Based on the experimental results obtained, it is apparent that the quantity of slag addition and the chemical composition of the cement made are the main parameters influencing the variation of mechanical resistances (bending and compression) of Mortars tested.

Key words: slag, cure, thermal activation, resistance, cement.