

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats sous forme de tableaux et sous forme de graphes où toutes les propriétés des ciments "CRS" étudiés et mentionnés précédemment seront analysés et interprétés.

Les résultats obtenus dans cette étude ont été regroupés dans des tableaux. Chaque tableau représente les différentes propriétés d'un ciment "CRS" d'une composition donnée avec ou sans ajout.

Les propriétés ont été classées, dans chaque tableau, en 3 catégories :

- Les propriétés physiques.
- Les propriétés mécaniques.
- L'analyse chimique.

Pour faciliter la lecture et la comparaison, ces tableaux ont été représentés par des groupes de trois. Chaque groupe montre pour la même composition, les différentes caractéristiques du ciment témoin et du ciment avec ajout.

Type de ciment	R _f moy (MPa)	R _c moy (MPa)	Jours
M T (0%)*	5,8	36,1	7 jours
	8,47	50,2	28 jours
	9,14	60,6	60 jours
M1 (5% FS et 2,5 %L) **	5,58	28,5	7jours
	7,76	53,96	28 jours
	8,80	65,53	60jours
M2 (7,5% FS et 22,5L) **	5,39	27,8	7 jours
	8,06	55,76	28 jours
	7,46	64,53	60 jours
M3 (10% FS et 20% L) **	5,39	29,91	7 jours
	7,9	55,33	28 jours
	8,80	62,41	60 jours

Tableau IV. 1 : La résistance à la compression et à la flexion des différents types de ciment.

*-MT : mortier témoin sans ajouts.

** - mortier avec ajouts.

Tableau IV. 2 : L'absorption des différents types de ciment A (%).

Type de ciment	Poids sèche (g)	Poids humide (g)	Variance (%)
Tm	545,77	578,75	6,04
M1	548,23	577,85	5,40
M2	538,31	569,21	5,74
M3	539,66	566,70	5,01

Tableau IV. 3 : composition chimiques des différents ciments étudiés.

Tm										
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	P.A.F	R.I
Teneur (%)	21.58	4.87	5.56	63.18	1.61	1.96	0.33	0	0.91	0.8
M1										
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	P.A.F	
Teneur (%)	26.22	5.89	4.43	51.39	2.92	1.59	0.41	0.035		2.11
M2										
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	P.A.F	
Teneur (%)	29.66	5.53	4.66	52.85	2.83	1.63	0.51	0.05		2.27
M3										
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	P.A.F	
Teneur (%)	31.33	5.46	4.59	51.32	2.79	1.61	0.51	0.05		2.34

Tableau IV. 4 : les essais physiques et mécaniques de ciment témoin (TM).

Essais physiques		
Finesse de mouture	M. V. abs (g/cm ³)	3.23
	S.S.B (cm ² /g)	3247
Consist. Normal (%)	E/C	25.6
Temps de prise (H.min)	Début	175
	Fin	265
Expansion le Chatelier (mm)	à Chaud	0
	à Froid	0
Retrait (µm/m)	28 jours	780
Gonflement (µm/m)	28 jours	225
Absorption (%)	60 jours	6.04
Essais mécaniques		
Résistance à la flexion (MPa)	7 jours	5.8
	28 jours	8,47
	60 jours	9.14
Résistance à la Compression (MPa)	7 jours	36,1
	28 jours	50,2
	60 jours	60.6

Tableau IV. 5 : Les essais physiques et mécaniques de mélange M1.

Essais physiques		
Finesse de mouture	M. V. abs (g/cm ³)	3,1362
	S.S.B (cm ² /g)	3904
Consist. Normal (%)	E/C	25,2
Temps de prise (H.min)	Début	160
	Fin	250
Expansion le chatelier (mm)	à Chaud	0
	à Froid	0
Retrait (µm/m)	28 jours	556,25
Gonflement (µm/m)	28 jours	18,75
Absorption (%)	60jours	5,40
Essais mécaniques		
Résistance à la flexion (MPa)	7 jours	5,58
	28 jours	7,76
	60 jours	8,80
Résistance à la Compression (MPa)	7 jours	28,5
	28 jours	53,96
	60 jours	65,53

Tableau IV. 6 : les essais physiques et mécaniques de mélange M2.

Essais physiques		
Finesse de mouture	M. V. abs (g/cm ³)	3,1351
	S.S.B (cm ² /g)	4039
Consist. Normal (%)	E/C	25
Temps de prise (H.min)	Début	155
	Fin	245
Expansion le chatelier (mm)	à Chaud	01
	à Froid	0
Retrait (µm/m)	28 jours	756,25
Gonflement (µm/m)	28 jours	368,75
Absorption (%)	60jours	5,74
Essais Mécaniques :		
Résistance à la flexion (MPa)	7 jours	5,39
	28 jours	8,06
	60 jours	7.46
Résistance à la Compression (MPa)	7 jours	27,08
	28 jours	55,76
	60 jours	64.53

Tableau IV. 7 : Les essais physiques et mécaniques de mélange M3.

Essais physiques		
Finesse de mouture	M. V. abs (g/cm^3)	3,1345
	S.S.B (cm^2/g)	4080
Consist. Normal (%)	E/C	25,2
Temps de prise (H.min)	Début	145
	Fin	225
Expansion le chatelier (mm)	à Chaud	01
	à Froid	0
Retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)	28 jours	791.05
Gonflement ($\mu\text{m}/\text{m}$)	28 jours	81.25
Absorption (%)	60 jours	5 .01
Essais Mécaniques		
Résistance à la flexion (MPa)	7 jours	5,39
	28 jours	7,9
	60 jours	8.8
Résistance à la Compression (MPa)	7 jours	29,91
	28 jours	55,33
	60 jours	62.41

IV.2 Les propriétés physiques

IV.2.1 La masse volumique (frais) :

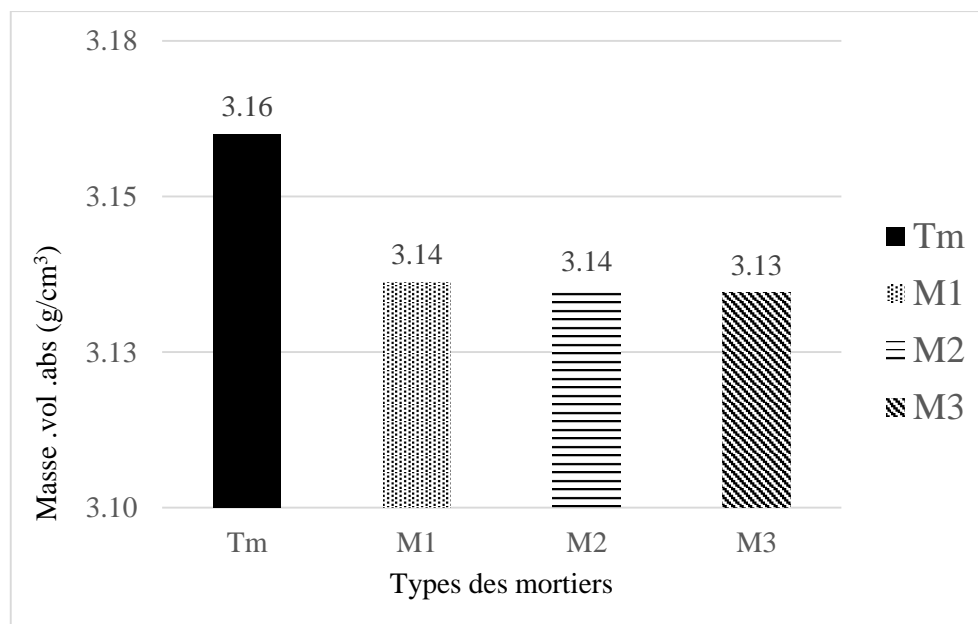


Figure IV.1 : La variation de la masse volumique absolue en fonction de pourcentage d'ajouts.

La figure IV.1, présente la variation de la masse volumique absolue on fonction du pourcentage des ajouts.

On remarque que la masse spécifique du mélange diminue avec l'augmentation du pourcentage de la fumée de silice et la diminution du pourcentage de laitier sa peut être expliqué par la faible masse spécifique de la fumée de silice par rapport au laitier et au ciment.

IV.2.2 La finesse (SSB) :

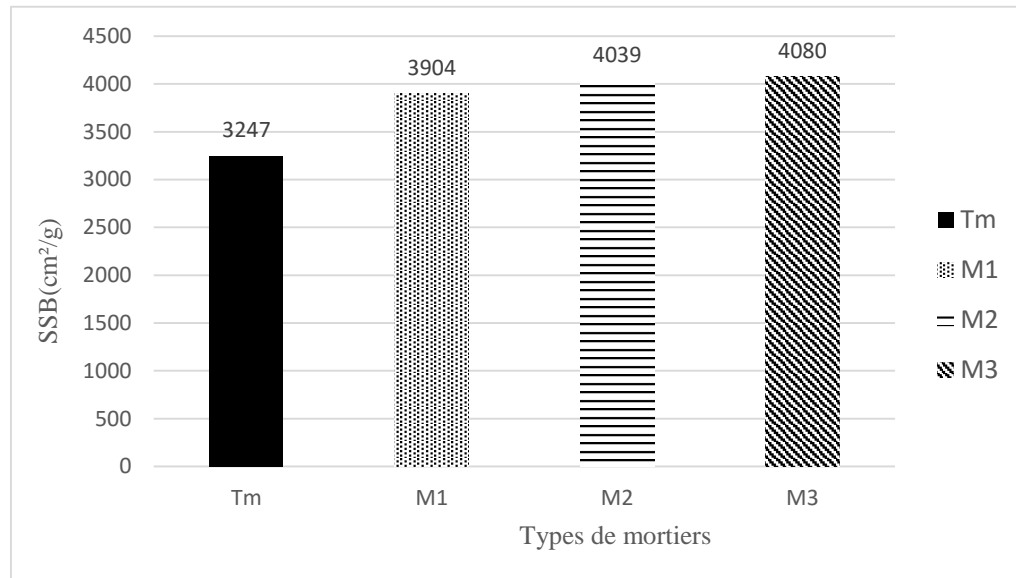


Figure IV. 2 : La variation de la surface spécifique de Blaine (SSB) en fonction du pourcentage d'ajouts.

La figure IV.2, représente la variation de la surface spécifique Blaine (SSB) en fonction du pourcentage des ajouts.

On remarque que la finesse du mélange augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'ajout et notamment la fumée de silice avec un $SSB = 7209 \text{ cm}^2/\text{g}$, car le laitier possède une SSB comparable avec celle du ciment témoin, on registre un écart de l'ordre de 20.4% entre le mélange 3 et le ciment témoin.

IV.2.3 La consistance normale :

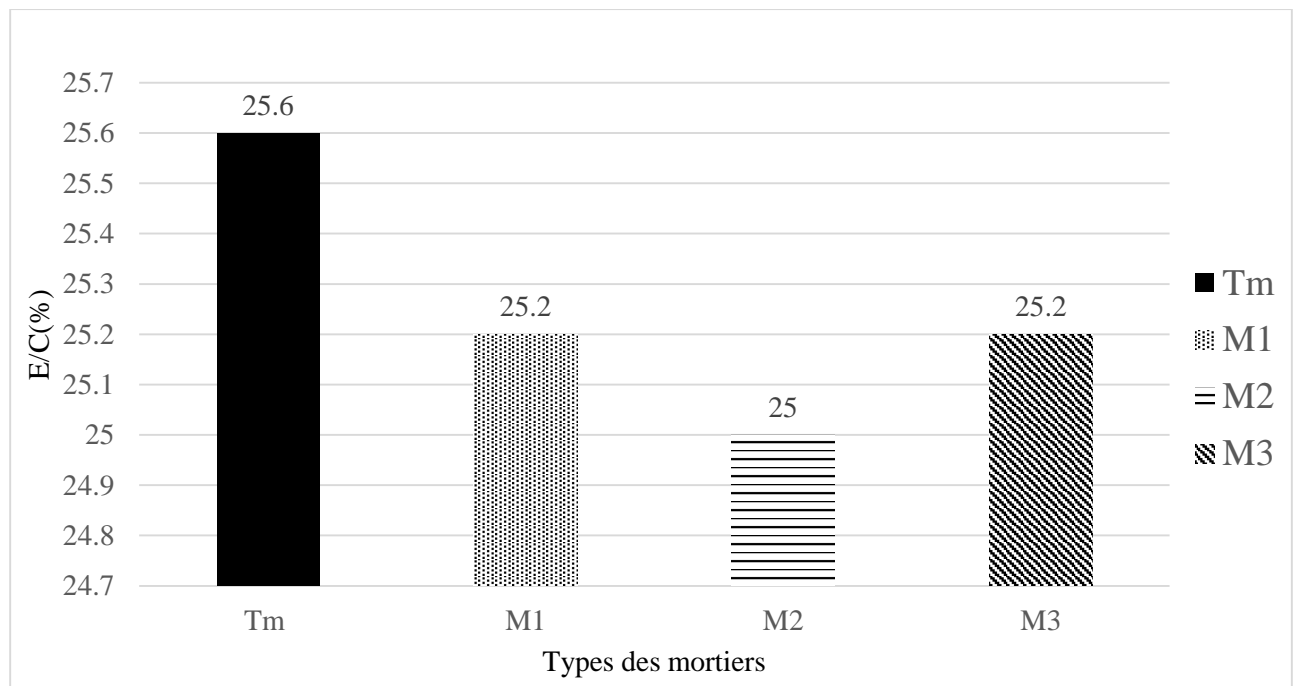


Figure IV. 3 : La variation de la consistance en fonction du pourcentage d'ajouts.

On remarque une diminution quasi linéaire de la consistance normale des pâtes de ciment testées avec le changement du pourcentage des ajouts pour les mélanges M1 et M2 d'ordre 1.6% et 2.34% respectivement ; cela peut-être expliqué par la nature des ajouts ; la fumée de silice est caractérisée par le taux élevé de SiO₂ (88.72%) donc une nature Vitreuse avec moins demande en eau comparativement au laitier qui est caractérisé par une structure poreuse ce qui augmente sa demande en eau.

On remarque une augmentation de la consistance normale pour le mélange M3 de l'ordre de 1.6% cela peut être expliqué par la grande surface spécifique de Blaine (SSB) de la fumée de silice qui nécessite une quantité supplémentaire d'eau pour recouvrir un nombre très important de grains.

IV.2.4 Temps de prise :

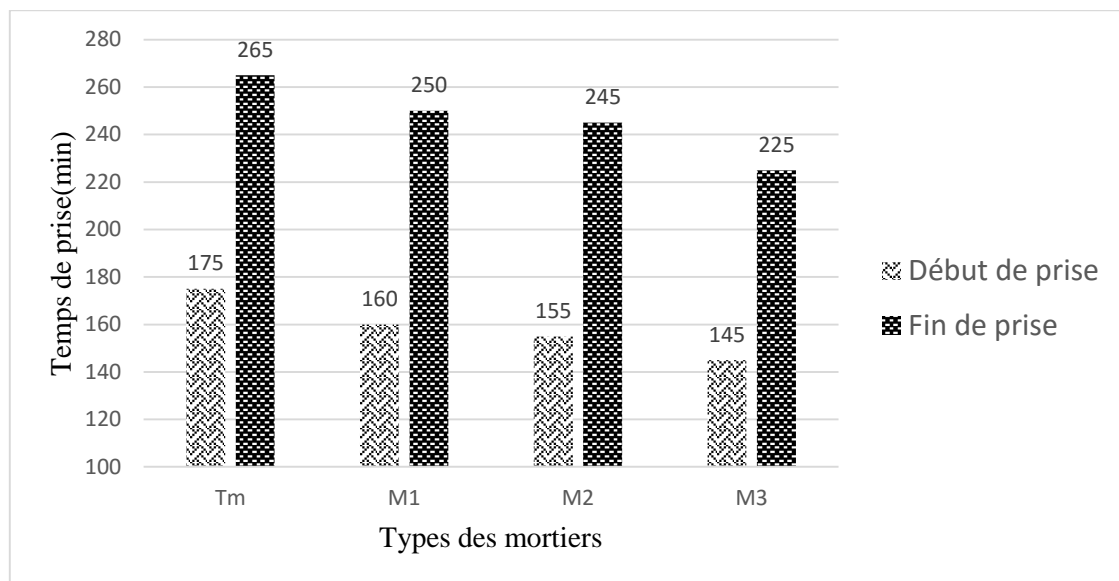


Figure IV. 4 : La variation du temps de prise en fonction du pourcentage d'ajouts.

La figure (IV.4) représente la variation du temps de prise en fonction du pourcentage d'ajouts. L'augmentation du pourcentage d'ajouts a diminué le temps de début de prise d'où on constate une diminution d'ordre de 15.09% entre le ciment témoin et le mélange M3 et une diminution d'ordre de 17.14% entre le ciment témoin et le mélange M3 pour la fin de prise. Cela peut être attribué à l'augmentation du pourcentage de fumée de silice qui influe sur le temps de prise car la cinétique de l'hydratation devient de plus en plus rapide avec l'augmentation de finesse de Blaine (SSB)). (Les fines adhèrent et activent le phénomène de prise à l'effet de SSB). [15]

IV.2.5 Retrait :

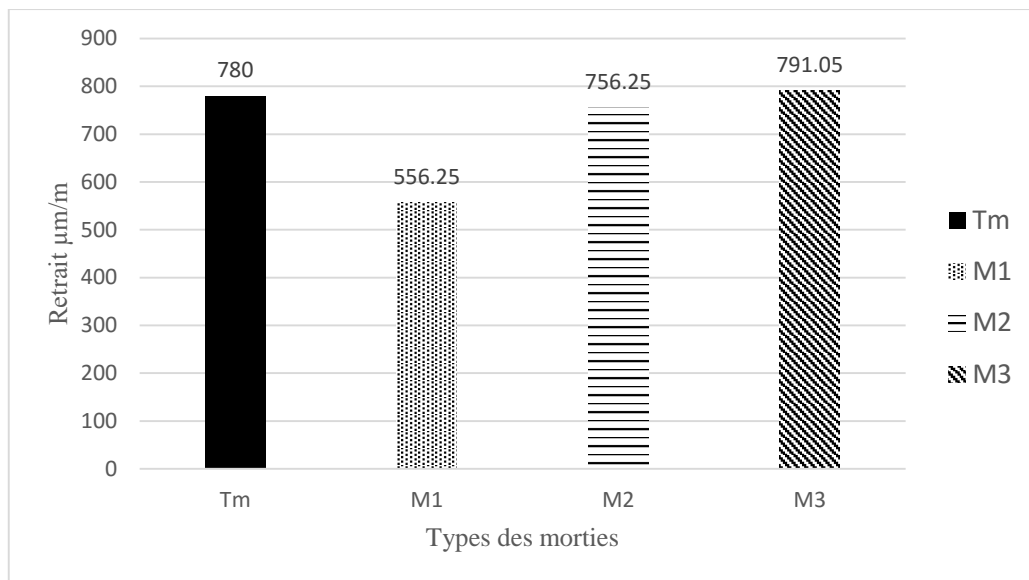


Figure IV. 5 : La variation du retrait pour les mortiers en fonction du pourcentage d'ajouts.

La figure IV.5 représente la Variation du retrait pour les mortiers en fonction de changement du pourcentage d'ajouts.

On remarque une diminution du retrait pour le mélange M1 d'ordre de 28.68% par rapport au ciment témoin et une augmentation d'ordre de 1.4% entre le mélange M3 et le ciment témoin. On peut expliquer cette variation par le besoin de ces mélanges en eau on vue de leur dosage élevé en fumée de silice car le retrait est influé par plusieurs paramètres comme : la température, le rapport E/C, la présence des ajouts et leur finesse.

IV.2.6 Le gonflement :

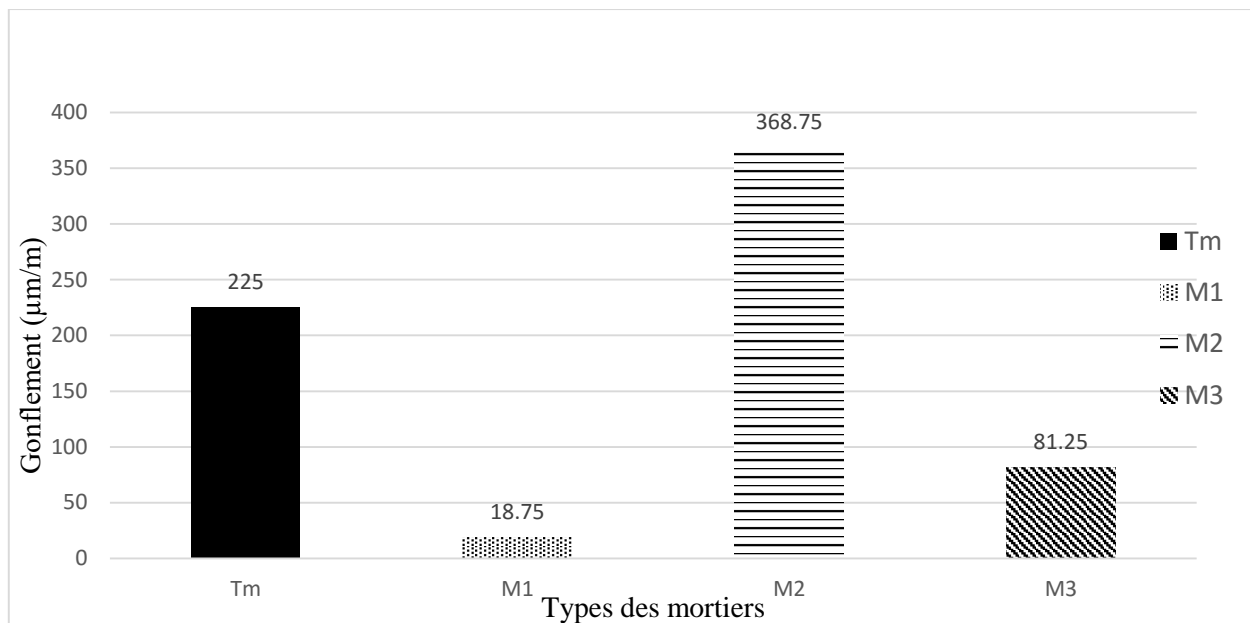


Figure IV. 6 : La variation du gonflement du mortier en fonction du pourcentage d'ajouts.

La figure IV. 6 représente la variation du gonflement du mortier en fonction du pourcentage d'ajouts.

On remarque que ces résultats obtenus sont conformes à la norme NF P 15-433 ($< 1000\mu\text{m/m}$).

IV.2.7 Expansion

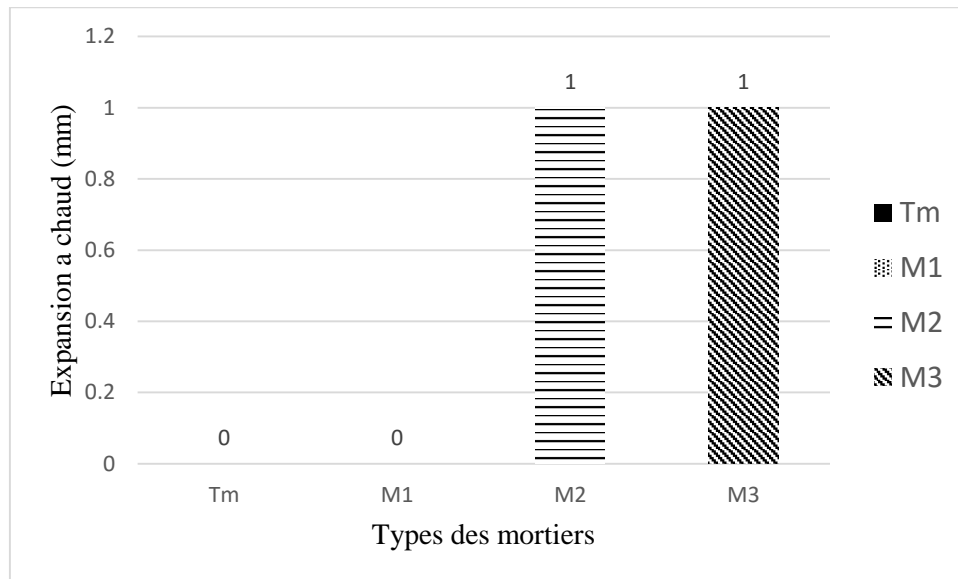


Figure IV. 7 : La variation d'expansion à chaud en fonction de changement du pourcentage d'ajouts.

Malgré les résultats obtenus et représentés dans la figure IV. 8 nous ne pouvons pas dire que l'expansion à chaud dépend du pourcentage d'ajout utilisé. Parce qu'en réalité, elles dépendent de la composition chimique du produit fini qui est indirectement lié aux pourcentages d'ajout. Ces derniers fixent la quantité du clinker dans le composé et celui-ci détermine, en grande partie, la composition chimique finale du mélange.

IV.2.8 Absorption (A%) :

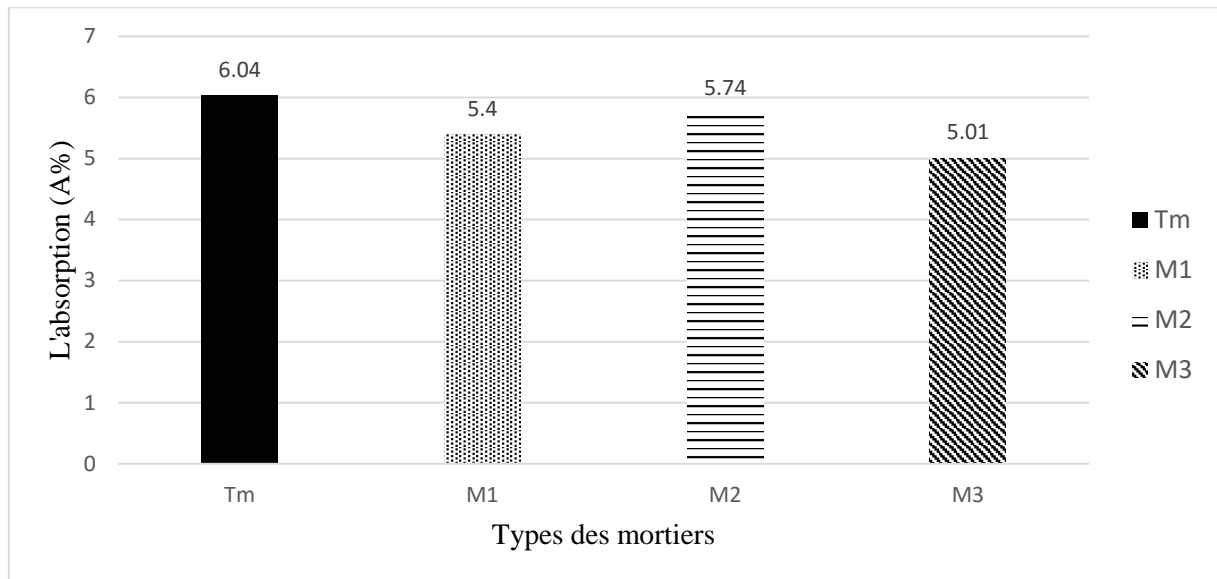


Figure IV.8 : La variation d'absorption des différents types de ciments en fonction du pourcentage d'ajouts.

La figure IV.8 présente l'effet des ajouts minéraux sur l'absorption capillaire d'eau par rapport au mortier témoin. On remarque :

L'absorption diminue avec la variation des ajouts d'où on enregistre une diminution d'ordre de 17.05% entre le ciment témoin et le mélange M3.

Les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre ces derniers et les grains de sable sont remplis par ces ajouts et notamment la fumée de silice grâce à sa grande finesse, et les pores capillaires sont réduits (La structure des minéraux qui ont un réseau compacte).

IV.3 Les propriétés mécaniques :

IV.3.1 La résistance à la compression :

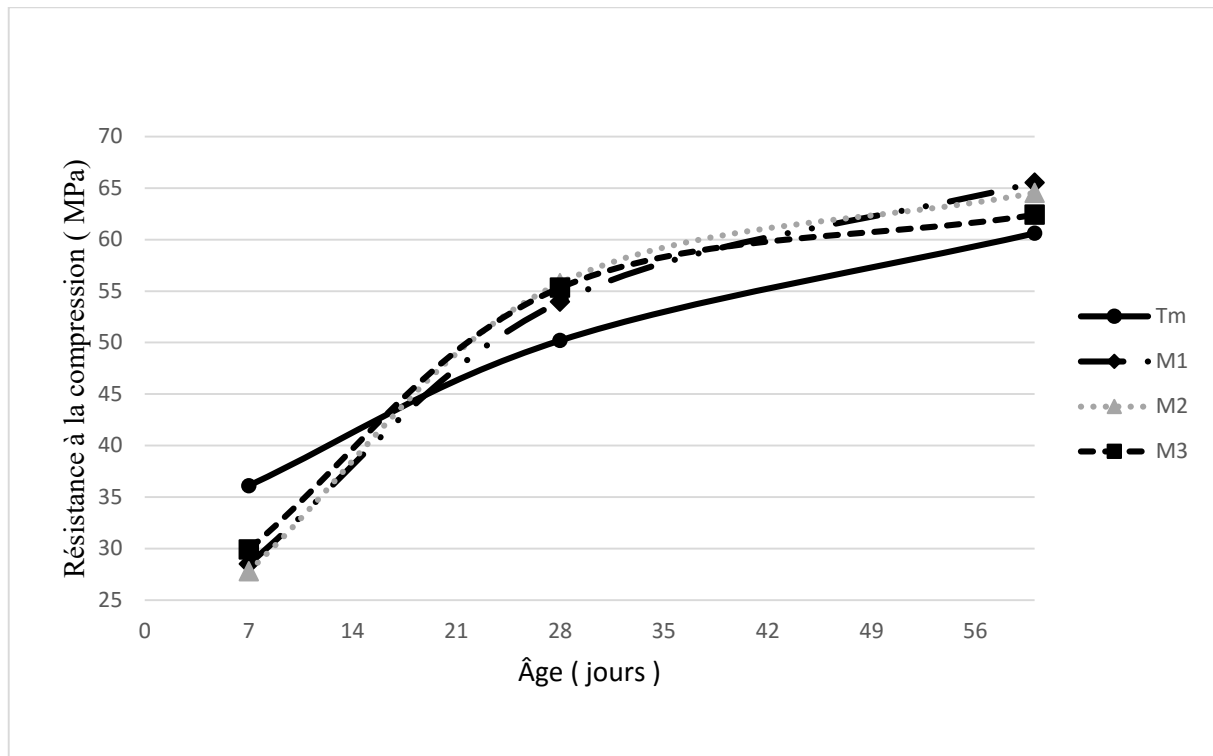


Figure IV. 9.a : La variation de la résistance à la compression des différents types de ciments en fonction du pourcentage d'ajouts.

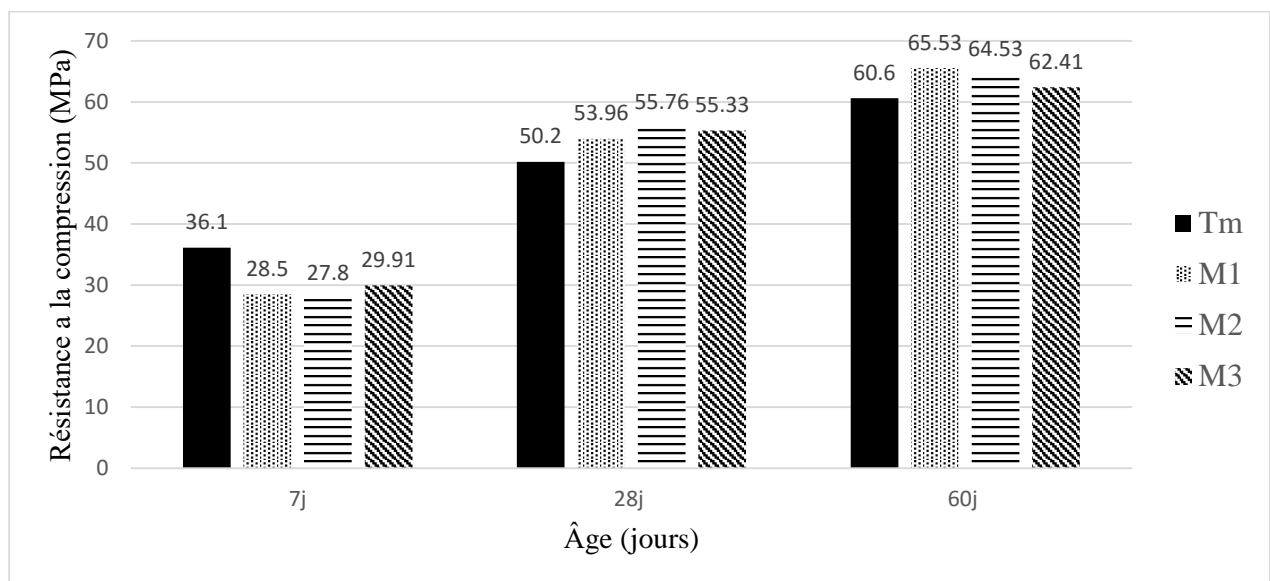


Figure IV.9.b : La variation de la résistance à la compression des différents types de ciments en fonction du pourcentage d'ajouts.

D'après cette figure IV.9.b, on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement avec l'âge du mortier 7, 28 et 60 jours.

La résistance des 3 mélanges (M1, M2, M3) est inférieure en comparaison le ciment témoin à l'âge de 7 jours, car les ajouts attendent la formation de la Portlandite pour réagir et former des hydrates C-S-H. Par contre, cette résistance reste légèrement supérieure par rapport au mortier témoin à l'âge de 28 et 60 jours, successivement.

La fumée de silice joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression des mortiers à court et à long terme (28 et 60 jours). Ce gain de résistance est dû à la forte activité pouzzolanique de la fumée de silice qui prend place très rapidement et consomme la Portlandite produite par l'hydratation du ciment et à sa très grande surface spécifique qu'elle joue le rôle de remplissage des fillers entre les grains du ciment, ce qui rend la pâte plus homogène et plus compacte et donc plus résistante.

Contrairement le laitier est un ajout pouzzolanique qui donne des résultats satisfaisants à long terme ce qui justifie les résultats obtenus pour le mélange M1 qui contient un taux élevé en laitier (figure IV.9.b).

On peut dire que les mélanges M1 (5% FS, 25% L) et M2 (7.5%FS, 22.5%L) donnent de bons résultats de la résistance à la compression(R_c).

IV.3.2 Résistance à la traction par flexion(R_f) :

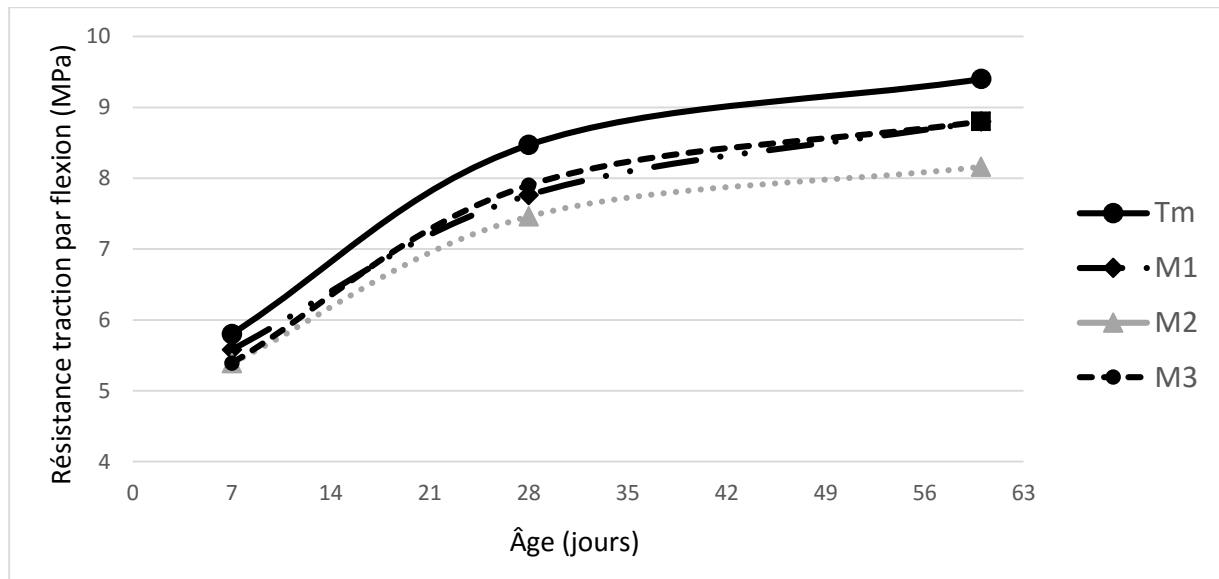


Figure IV. 10.a : La variation de la résistance à la traction par flexion des différents types de ciments en fonction du pourcentage d'ajouts.

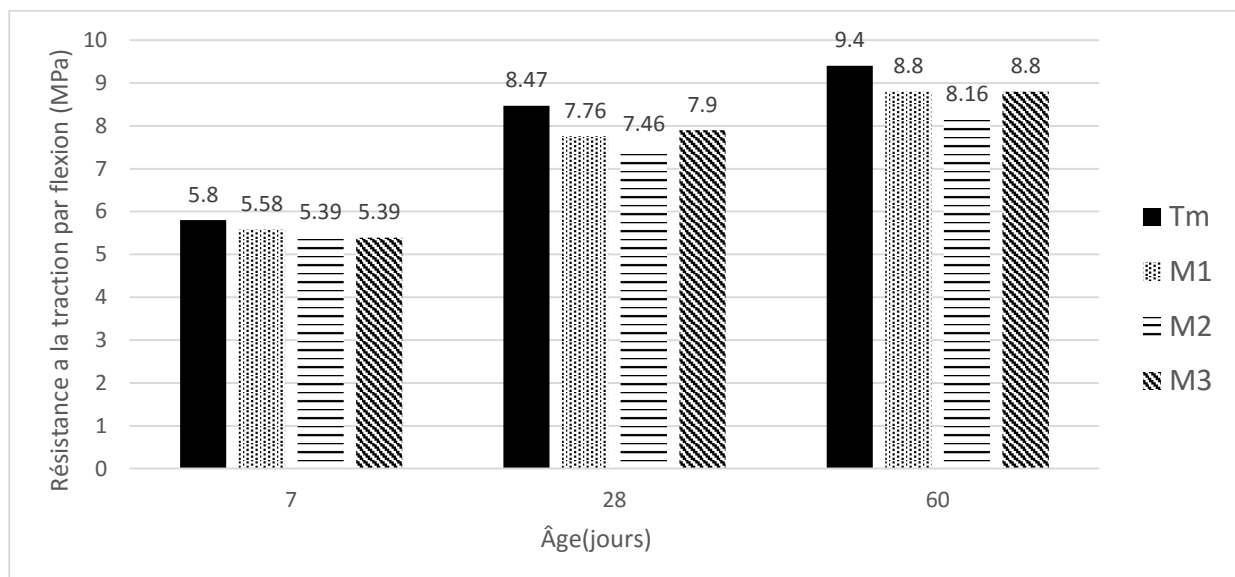


Figure IV. 10. b : La variation de la résistance à la traction par flexion des différents types de ciments en fonction du pourcentage d'ajouts.

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 7, 28 et 60 jours

Cette résistance est inférieure au mortier témoin aux âges 7, 28 et 60 jours successivement.

On remarque que tous les mélanges ont des résistances inférieures à celle du ciment témoin ; ça peut être due au comportement de ces ajouts ; qui attendent la formation de

la Portlandite résulte du processus d'hydratation pour produire d'autre C-S-H et donc ils travaillent à long terme.

On peut dire que les mélanges M1 (5% FS, 25% L) et M3 (10% FS, 20% L) donnent des bons résultats.

IV.4 Conclusion :

A la lumière des résultats obtenus, on conclue que les ajouts minéraux actifs (Laitier haut fourneau, fumé de silice), contribuent d'une façon positive sur les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CRS de (Ain Kebira). Ils améliorent les caractéristiques physiques par la réduction de la masse volumique absolue, la consistance normale, le temps de prise, le retrait et le gonflement, l'absorption, aussi ; ils améliorent les performances mécaniques, ou on obtient des résistances mécaniques qui sont meilleures ou très proches comparé au mortier témoin à court et à long terme selon les différentes combinaisons avec ces additions (fumée de silice et laitier).

Conclusion générale

D'après cette étude sur l'utilisation des ajouts minéraux en particulier la fumée de silice et le laitier pour la formulation d'un ciment ternaire qui répond aux exigences techniques, économiques et écologiques, on conclue que :

Les ajouts minéraux utilisés dans cette étude (laitier et fumée de silice) ont des effets favorables on ce qui concerne les caractéristiques physiques du ciment élaboré dans notre projet de recherche, améliorations en ce qui concerne la masse volumique absolue, la surface spécifique de Blaine, consistance normale, début et fin de prise, l'expansion, retrait, gonflement et l'absorption.

- Le mélange (M3) présente des meilleurs résultats par rapport aux autres mélanges grâce à sa composition optimale (10% fumée de silice et 20% laitier).
- Pour les propriétés mécaniques les ajouts améliorent la résistance à la compression à moyen et à long terme.
- Le mélange (M1) présente un meilleur résultat vis-à-vis de la résistance à la compression grâce à son dosage élevé en laitier comparativement aux autres mélanges.
- Les ajouts n'ont pas un effet remarquable sur la résistance à la traction par flexion.
- Les mélanges (M1 et M3) donnent des résultats similaires à celui du ciment témoin sur le plan technique et économique.

Perspectives

Sur la base de cette étude sur les ciments ternaires à base d'ajouts combinés (fumée de silice et laitier), nous proposons des travaux de recherche qui vont être axés sur :

- ✓ Etude des caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques des mortiers à base de ciment contenant d'autres ajouts inertes comme les fillers de calcaire ou actifs comme la pouzzolane.
- ✓ Etude des caractéristiques physico-chimiques et rhéologique du béton à base de ciment ternaire.
- ✓ Etude du comportement mécanique d'un béton confectionné à base de ciment ternaire avec ajout de fumée de silice et laitier selon un dosage optimal.
- ✓ Etude de la durabilité des mortiers et des bétons à formulation de ciment ternaire.
- ✓ Etude de la compatibilité entre notre ciment ternaire et les adjuvants superplastifiant.

