



UNIVERSITÉ
de Cergy-Pontoise

UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE
Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie
Département de Génie Civil



UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie Civil

THESE

Présentée pour obtenir le grade de Docteur d'Etat en Génie Civil
Spécialité : Matériaux de construction

N° d'ordre :

Série :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA CINETIQUE D'HYDRATATION AU JEUNE AGE DES
BETONS A HAUTES RESISTANCES**

Par

Mustapha CHEIKH-ZOUAOU

1. Laboratoire de Matériaux et Sciences des constructions LMSC Cergy Pontoise Paris
2. Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Constructions LMDC Constantine

Thème

Soutenu le

Devant le jury composé de :

Président :

M. Hacène HOUARI Professeur - Université Mentouri Constantine

Encadreurs :

M. Nasr-Eddine CHIKH Professeur - Université Mentouri Constantine
M. Roger DUVAL Professeur Emérite - Université de Cergy-Pontoise (France)
M^{me} Salima AGGOUN Maître de Conférences - Université de Cergy-Pontoise (France)

Examineurs :

M. Yves DELMAS Professeur, Université de Reims (France)
M. Mouloud BELACHIA Professeur - Université SKIKDA

Dédicace

A ma famille et particulièrement mon épouse dont le soutien et les encouragements ininterrompus ont permis à ce travail de voir le jour.

A mes enfants Mohamed Aymène, Louba et Walid dont j'ai pris une grande part de leur temps afin d'accomplir ce travail, qu'ils trouvent ici toutes mes reconnaissances et l'expression de toute ma gratitude.

Remerciements

Que toutes celles et tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ces travaux de recherche, trouvent ici le témoignage de ma plus sincère gratitude.

Tout d'abord, un énorme et chaleureux merci à Monsieur CHIKH Nasreddine, mon directeur de thèse, qui a su me faire partager son savoir-faire et sa rigueur scientifique qui m'ont été très précieux pour la réalisation des essais, l'analyse des résultats, la publication de mes articles et la rédaction de ce mémoire. Merci pour sa très grande disponibilité, sa bonne humeur, ses encouragements et son soutien moral dans les moments les plus difficiles de la thèse.

Un grand merci à Salima AGGOUNE et Roger DUVAL pour avoir encadré et suivi ce travail, et pour leurs orientations constructives et leurs nombreux conseils. Merci beaucoup pour tout le temps qu'ils m'ont consacré et pour les nombreux encouragements.

Je tiens également à remercier le Professeur Hacène HOUARI qui a accepté de lire et de critiquer mon travail et qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je souhaite exprimer mes remerciements à Messieurs YVES DELMAS et BELACHIA Mouloud pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux et pour avoir accepté la lourde tâche d'en être les rapporteurs.

Enfin merci aux précieux amis que j'ai pu me faire à l'université de Cergy : KADRI, ALBERT ainsi que tout le personnel administratif. Je les remercie pour leur écoute, leur gentillesse, leur soutien permanent et leurs encouragements jusqu'aux derniers moments. Les années passées ensemble resteront inoubliables.

Un grand merci aux précieux amis de tous les jours : AZZIZ, MOHAMED, ALI, DJAMEL, AMAR, NABIL, NACIM, BRAHIM, RACHID, TAMOUD, KIKIetc. Je les remercie pour leur écoute, leur gentillesse, leur soutien permanent.

Un grand merci à mon très cher ami NADIR qui grâce a son aide précieuse j'ai pu accomplir ce travail.

Un merci particulier à tous les collègues du groupe GENISIDER et particulièrement ceux de la filiale GESI PREFEA qui m'ont tout le temps soutenu par la mise a disposition de tout le matériel de laboratoire ainsi que les matériaux, qu'ils trouvent ici ma plus sincère gratitude.

Enfin, je souhaite exprimer mes plus chaleureux remerciements à ceux qui ont été là en toutes circonstances et qui m'ont encouragé depuis toujours : mes parents, mes beaux parents mes frères et sœurs et mes beaux frères et belles soeurs.

REMERCIEMENTS		
DEDICACES		
LISTE DES FIGURES		
LISTE DES TABLEAUX		
NOTATIONS		
RESUME		
INTRODUCTION GENERALE		1
	1 OBJET DE LA THESE	3
	2 CONTENU DE LA THESE	4
CHAPITRE 1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE		6
	1.1 INTRODUCTION	6
	1.2 NOTION DE BASE	6
	1.3 LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES	8
	1.3.1 OBTENTION DES BHP	10
	1.3.2 RESISTANCE EN COMPRESSION DES BHP	11
	1.4 ACTION DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRE	12
	1.5 LES ADJUVANTS	13
	1.5.1 INTERET DES ADJUVANTS	14
	1.5.2 DIFFERENTS TYPES D'ADJUVANTS	14
	1) LES SUPERPLASTIFIANTS HAUTS REDUCTEURS D'EAU	15
	2) ACCELERATEURS DE PRISE ET DE DURCISSEMENT	17
	1.6 CONCLUSION	26
CHAPITRE 2 ETUDE EXPERIMENTALE		29
	2.1 INTRODUCTION	29
	2.2 MATERIAUX UTILISES	29
	2.3 METHODES D'ESSAIS	33
	2.3.1 ESSAI DE PRISE	33
	2.3.2 ESSAI DE RESISTANCE MECANIQUE	33
	2.3.3 ESSAI DE MESURE DE LA CHALEUR D'HYDRATATION DES CIMENTS	34
CHAPITRE 3 INFLUENCE DES ADDITIONS ET SUBSTITUTIONS SILICEUSES SUR LES TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANQUES DES PATES DE CIMENTS DE BASE		36
	3.1 EFFET DE LA FUMEE DE SILICE (FS) SUR LE TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANQUES	36
	3.2 EFFET DE L'HOMOGENEISATION SABLE SILICEUX (HS) SUR LES TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANQUES	39
	3.3 EFFET DU SABLE SILICEUX BROYE UTILISE COMME ADDITION SUBSTITUE AU CIMENT SUR LE TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANQUES (SS)	41

Table des matières suite

3.4 COMPARAISON DES EFFETS DES DIFFERENTES ADDITIONS SUR LES TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANIQUES DES CIMENTS C1 ET C2	43
3.4.1 CIMENT C1	43
3.4.1.1 TEMPS DE PRISE	43
3.4.1.2 RESISTANCE MECANIQUE	44
3.4.2 CIMENT C2	46
3.4.2.1 TEMPS DE PRISE	46
3.4.2.2 RESISTANCE MECANIQUE	47
3.5 CONCLUSION	48
CHAPITRE 4 INFLUENCE DU NITRATE DE CALCIUM COMME ACCELERATEUR DE PRISE SUR LES PATES DE CIMENTS	49
4.1 MELANGE A BASE DE CIMENT C1	49
4.1.1 TEMPS DE PRISE	49
4.1.2 RESISTANCE MECANIQUE	54
4.2 MELANGE A BASE DE CIMENT C2	59
4.2.1 TEMPS DE PRISE	59
4.2.2 RESISTANCE MECANIQUE	64
4.3 CONCLUSION	70
CHAPITRE 5 INFLUENCE DES ALCANOLAMINES COMME ACCELERATEURS DE DURCISSEMENT SUR LES PATES DE CIMENTS	71
5.1 EFFET DU DOSAGE EN TRIETHANOLAMINE (TEA)	71
5.1.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1	71
5.1.1.1 TEMPS DE PRISE	71
5.1.1.2 RESISTANCES MECANIQUES	76
5.1.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2	85
5.1.2.1 TEMPS DE PRISE	85
5.1.2.2 RESISTANCES MECANIQUES	91
5.2 EFFET DU DOSAGE EN TRIISOPROPANOLAMINE (TIPA)	98
5.2.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1	98
5.2.1.1 TEMPS DE PRISE	98
5.2.1.2 RESISTANCES MECANIQUES	104
5.2.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2	112
5.2.2.1 TEMPS DE PRISE	112
5.2.2.2 RESISTANCES MECANIQUES	117
5.3 CONCLUSION	124

Table des matières suite

CHAPITRE 6 ETUDE DES COMBINAISONS D'ADJUVANTS SUR LES PATES DE CEMENTS	6.1 EFFET DU DOSAGE EN TEA COMBINE AU NITRATE DE CALCIUM (NC)	126
	6.1.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1	126
	6.1.1.1 TEMPS DE PRISE	126
	6.1.1.2 RESISTANCE MECANIQUE	131
	6.1.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2	137
	6.1.2.1 TEMPS DE PRISE	137
	6.1.2.2 RESISTANCE MECANIQUE	142
	6.2 EFFET DU DOSAGE EN TIPA COMBINE AU NITRATE DE CALCIUM (NC)	147
	6.2.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1	147
	6.2.1.1 TEMPS DE PRISE	147
	6.2.1.2 RESISTANCE MECANIQUE	151
	6.2.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2	157
	6.2.2.1 TEMPS DE PRISE	157
	6.2.2.2 RESISTANCE MECANIQUE	161
	6..3 CONCLUSION	168
CHAPITRE 7 MESURE DE LA CHALEUR D'HYDRATATION DES MELANGES DE BASE AVEC ADJUVANTS		169
	7.1 CALCUL DE LA CHALEUR D'HYDRATATION	170
	1) CALCUL DE LA CHALEUR CUMULEE DANS LE CALORIMETRE AU TEMPS t	170
	2) CALCUL DE LA CHALEUR DISSIPÉE VERS LE MILIEU AMBIANT	171
	3) MESURE DE LA QUANTITÉ DE CHALEUR DÉGAGÉE PAR LA PÂTE DE CIMENT	171
	7.2 ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS	172
	7.2.1 RESULTATS EN TERME DE TEMPERATURES	172
	7.2.2 RESULTATS EN TERME DE CHALEUR D'HYDRATATION	175
	7.3 CONCLUSION	177
CHAPITRE 8 SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS SUR LES RESISTANCES MECANQUES DES MELANGES AVEC ADJUVANTS		178
	8.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1	178
	8.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2	183
	8.3 CONCLUSION	188

Table des matières suite

CHAPITRE 9 INFLUENCE DU NITRATE DE CALCIUM ET DES ALCANOLAMINES (TEA, TIPA) SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS NORMALISES	190
9.1 PREPARATION DES MORTIERS	190
9.2 ESSAI AU MANIABILIMETRE LCPC	192
9.3 TEMPS DE PRISE ET RESISTANCES MECANIQUES	196
9.3.1 EFFET DU NITRATE DE CALCIUM	197
9.3.2 EFFET DE LA TRETHANOLAMINE	198
9.3.3 EFFET DE LA TRISOPRANOLAMINE	199
9.3.4 EFFET DE LA COMBINAISON NITRATE DE CALCIUM- TRIETHANOLAMINE	201
9.3.5 EFFET DE LA COMBINAISON NITRATE DE CALCIUM- TRIISOPROPANOLAMINE	202
9.3.6 COMPARAISON ENTRE L'EFFET DE LA TRIETHANOLAMINE ET LA TRIISOPROPANOLAMINE	204
9.4 CONCLUSION	206
COCLUSION GENERALE	207
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ANNEXES	212

Liste des figures

Figure 1.1: Représentation schématique du mécanisme de durcissement	7
Figure 1.2 : Effet du rapport E/L sur la chaleur de trois jours d'hydrations des pâtes de liant	8
Figure 1.3 : Effet du rapport E/L sur le taux exothermique d'hydrations des pâtes	9
Figure 1.4 : Effets du super plastifiant sur l'élévation de la température des pâtes	9
Figure 1.5 : Courbes de la température en fonction du temps pour les échantillons avec une seule addition minérale	9
Figure 1.6 : Courbes la température en fonction du temps pour les échantillons avec double et triple addition minérale	10
Figure 1.7 : Effet des combinaisons d'additions sur la chaleur d'hydratation pour une échéance de trois jours	10
Figure 1.8: Illustration schématique du blocage des sites réactifs par les molécules d'un super plastifiant	16
Figure 1.9: Illustration schématique de l'influence des super plastifiants sur la formation des hydrates	17
Figure 1.10 : Influence d'un accélérateur de prise sur le temps de prise et la résistance à la compression à court terme mesurée sur un mortier normalisé conservé à 5 et 20°C	20
Figure 1.11: Résistance à la compression, à 16 et à 20 heures, de bétons avec et sans accélérateur	21
Figure 1.12: Evolution de la température mesurée au cœur d'éprouvettes 16x32cm	22
Figure 1.13 : Courbe Température / temps de durcissement pour des bétons avec des dosages équivalents de nitrate, d'acétate soluble et de formiate de fer de calcium comparé au béton de référence	22
Figure 1.14: Les profils de pénétration de l'aiguille de Vicat dans les pâtes de ciment du type I & II de l'ASTM avec différents Dosages de CN à 5°C et 7°C [43]	24
Figure 1.15 : La corrélation linéaire entre l'efficacité d'accélération de 1,55 % d'additions de CN sur différents ciments et leur teneur de bélite a 5°C [43]	24
Figure 2.1 : Appareil de Vicat automatique (presse hydraulique)	33
Figure 2.2 : Dispositif de mesure de la résistance	34
Figure 2.3 Dispositif expérimental de mesure de la quantité de chaleur	35
Figure 3.1 : Effet de la fumée de silice sur le temps de prise des mélanges à base de ciment C1	37
Figure 3.2 : Effet de la fumée de silice sur l'évolution des résistances des mélanges à base de ciment C1	37
Figure 3.3 : Effet de la fumée de silice sur le temps de prise des mélanges à base de ciment C2	38
Figure 3.4 : Effet de la fumée de silice sur l'évolution des résistances des mélanges à base de ciment C2	38
Figure 3.5: Effet de l'homogénéisation sable-ciment C1 sur le temps de prise	39
Figure 3.6 : Effet de l'homogénéisation sable- ciment C1 sur l'évolution des résistances	39

Figure 3.7: Effet de l'homogénéisation sable-ciment C2 sur le temps de prise	40
Figure 3.8 : Effet de l'homogénéisation sable-ciment C2 sur l'évolution des résistances	40
Figure 3.9 : Effet du sable siliceux comme addition sur le temps de prise du ciment C1	41
Figure 3.10: Effet du sable siliceux comme addition sur l'évolution des résistances du ciment C1	41
Figure 3.11 : Effet du sable siliceux comme addition sur le temps de prise du ciment C2	42
Figure 3.12 : Effet du sable siliceux comme addition sur l'évolution des résistances du ciment C2	42
Figure 3.13: Comparaison entre les effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C1	43
Figure 3.14 : Comparaison entre les effets des différentes additions sur l'évolution des résistances du ciment C1	43
Figure 3.15: Comparaison entre les effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C2 avec le taux de 7.5%	44
Figure 3.16 : Comparaison entre les effets des différentes additions sur l'évolution de la résistance du ciment C2 avec le taux de 7.5%	45
Figure 3.17 : Comparaison entre les effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C1 avec le taux de 10%	46
Figure 3.18 : Comparaison entre les effets des différentes additions sur l'évolution des résistances du ciment C1 avec le taux de 10%	46
Figure 3.19 : Comparaison entre les différentes additions sur le temps de prise du ciment C2 avec le taux de 10%	47
Figure 3.20: Comparaison entre les différentes additions sur l'évolution des résistances du ciment C2 avec le taux de 10%	47
Figure 4.1 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M1-1	49
Figure 4.2 : Effet de NC sur le temps de prise -Mélange M2-1	50
Figure 4.3 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M3-1	50
Figure 4.4 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M7-1	51
Figure 4.5 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M8-1	51
Figure 4-6 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M12-1	52
Figure 4.7 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M13-1	53
Figure 4.8 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M1-1	54
Figure 4.9 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques -Mélange M2-1	54
Figure 4.10 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M3-1	55
Figure 4.11 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques- Mélange M7-1	55
Figure 4.12 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M8-1	56
Figure 4.13 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M12-1	56
Figure 4.14 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques – Mélange M13-1	57
Figure 4.15: Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC	58
Figure 4.16 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M4-1	59
Figure 4.17: Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M5-1	59
Figure 4.18 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M6-1	60
Figure 4.19 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M9-1	60
Figure 4.20 : Effet de NC sur le temps de prise -Mélange M10-1	61

Liste des figures (suite)

Figure 4.21: Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M14-1	61
Figure 4.22 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M15-1	62
Figure 4.23 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M4-1	64
Figure 4.24 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M5-1	65
Figure 4.25 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M6-1	65
Figure 4.26 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M9-1	66
Figure 4.27 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M10-1	66
Figure 4.28 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M14-1	67
Figure 4.29: Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M15-1	67
Figure 4.30 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC	69
Figure 5.1 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise -Mélanges M1-2 & M1-4	71
Figure 5.2 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M2-2 & M2-4	72
Figure 5.3 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise -Mélanges M3-2 & M3-4	73
Figure 5.4 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M7-2 & M7-4	73
Figure 5.5 : Essai de prise ; Effet du dosage en TEA -Mélanges M8-2 & M8-4	74
Figure 5.6 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M12-2 & M12-4	74
Figure 5-7 : Essai de prise ; Effet du dosage en TEA -Mélanges M13-2 & M13-4	75
Figure 5.8 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M1-2 & M1-4	77
Figure 5.9 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances - Mélange M2-2 & M2-4	77
Figure 5.10 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances - Mélange M3-2 & M3-4	78
Figure 5.11 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances - Mélange M7-2 & M7-4	79
Figure 5.12 : Essai de résistance ; Effet du dosage en TEA -Mélange M8-2 & M8-4	79
Figure 5.13 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M12-2 & M12-4	80
Figure 5.14 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M13-2 & M13-4	81
Figure 5.15 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges a base de ciment C1, effet de TEA	83
Figure 5-16 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise -Mélanges M4-2 & M4-4	85
Figure 5.17: Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélange M5-2 & M5-4	86
Figure 5.18 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M6-2 & M6-4	86
Figure 5.19 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M9-2 & M9-4	87
Figure 5.20 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélange M10-2 & M10-4	87
Figure 5.21 : Essai de prise ; Effet du dosage en TEA -Mélange M14-2 & M14-4	88
Figure 5.22 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M15-2 & M15-4	89
Figure 5.23 Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M4-2 & M4-4	91
Figure 5.24 Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M5-2 & M5-4	92
Figure 5.25 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélange M6-2 & M6-4	92

Figure 5.26 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M9-2 & M9-4	93
Figure 5.27 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M10-2 & M10-4	94
Figure 5.28 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M14-2 & M14-4	94
Figure 5.29 Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélange M15-2 & M15-4	95
Figure 5.30 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TEA	97
Figure 5.31 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M1-6 & M1-8	98
Figure 5.32 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M2-6 & M2-8	99
Figure 5.33 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M3-6 & M3-8	100
Figure 5.34 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M7-6 & M7-8	100
Figure 5.35 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M8-6 & M8-8	101
Figure 5.36 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M12-6 & M12-8	101
Figure 5.37 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M13-6 & M13-8	102
Figure 5.38 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélange M1-6 & M1-8	104
Figure 5.39 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélange M2-6 & M2-8	104
Figure 5.40 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M3-6 & M3-8	105
Figure 5.41: Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélanges M7-6 & M7-8	106
Figure 5.42 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélanges M8-6 & M8-8	106
Figure 5.43 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M12-6 & M12-8	107
Figure 5.44 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M13-6 & M13-8	108
Figure 5.45 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de TIPA	110
Figure 5.46 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M4-6 & M4-8	112
Figure 5.47 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M5-6 & M5-8	113
Figure 5.48 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélange M6-6 & M6-8	113
Figure 5.49: Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélange M9-6 & M9-8	114
Figure 5.50 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M10-6 & M10-8	114
Figure 5.51 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M14-6 & M14-8	115
Figure 5.52: Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M15-6 & M15-8	115
Figure 5.53 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M4-6 & M4-8	117
Figure 5.54 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélanges M5-6 & M5-8	117
Figure 5.55 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M6-6 & M6-8	118
Figure 5.56 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M9-6 & M9-8	119
Figure 5.57 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M10-6 & M10-8	119
Figure 5.58 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M14-6 & M14-8	120
Figure 5.59 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M15-6 & M15-8	120

Liste des figures (suite)

Figure 5.60 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TIPA	123
Figure 6.1 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise -Mélanges M1-3 & M1-5	126
Figure 6.2 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M2-3 & M2-5	127
Figure 6.3 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M3-3 & M3-5	127
Figure 6.4 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M7-3 & M7-5	128
Figure 6.5 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M8-3 & M8-5	128
Figure 6.6 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M12-3 1 M12-5	129
Figure 6.7 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M13-3 & M13-5	129
Figure 6.8: Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M1-3 & M1-5	131
Figure 6.9 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M2-3 & M2-5	132
Figure 6.10 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistance - Mélanges M3-3 & M3-5	132
Figure 6.11 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M7-3 & M7-5	133
Figure 6.12 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M8-3 & M8-5	133
Figure 6.13 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances – Mélanges M12-3 &M12-5	134
Figure 6.14 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélange M13-3 & M13-5	135
Figure 6.15 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M4-3 & M4-5	137
Figure 6.16 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M4-3 & M4-5	138
Figure 6.17 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M5-3 & M5-5	138
Figure 6.18 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M6-3 & M6-5	139
Figure 6.19: Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M9-3 & M9-5	139
Figure 6.20 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M10-3 & M10-5	140
Figure 6.21 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M14-3 &M14-5	140
Figure 6.22 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M15-3 & M15-5	142
Figure 6.23 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M4-3 & M4-5	142
Figure 6.24 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M5-3 & M5-5	143
Figure 6.25 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M6-3 & M6-5	144
Figure 6.26 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M9-3 & M9-5	144
Figure 6.27 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M10-3 & M10-5	145
Figure 6.28 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M14-3 & M14-5	145
Figure 6.29 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélange M15-3 & M15-5	147
Figure 6.30 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M1-7 & M1-9	148
Figure 6.31 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M2-7 & M2-9	148
Figure 6.32 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M3-7 & M3-9	149
Figure 6.33 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M7-7 & M7-9	149
Figure 6.34 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M8-7 & M8-9	150
Figure 6.35 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M12-7 & M12-9	150

Figure 6.36: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M13-7 & M13-9	152
Figure 6.37 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M1-7 & M1-9	152
Figure 6.38: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M2-7 & M2-9	153
Figure 6.39 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M3-7 & M3-9	153
Figure 6.40 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M7-7 & M7-8	154
Figure 6.41 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M8-7 & M8-9	154
Figure 6.42 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M12-7 & M12-9	155
Figure 6.43 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M13-7 & M13-9	157
Figure 6.44 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M4-7 & M4-9	157
Figure 6.45: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M5-7 & M5-9	158
Figure 6.46: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélange M6-7 & M6-9	158
Figure 6.47: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M9-7 & M9-9	159
Figure 6.48: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M10-7 & M10-9	159
Figure 6.49 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M14-7 & M14-9	160
Figure 6.50: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise -Mélanges M15-7 & M15-9	161
Figure 6.51: Effet de NC combiné à TIPA sous l'effet de NC+TIPA - Mélanges M4-7 & M4-9	162
Figure 6.52: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M5-7 & M5-9	162
Figure 6.53: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélange M6-7 & M6-9	163
Figure 6.54: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélange M9-7 & M9-9	164
Figure 6.55 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M10-7 & M10-9	164
Figure 6.56 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélange M14-7 & M14-9	165
Figure 6.57: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M15-7 & M15-9	
Figure 6.58 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC+TIPA	167
Figure 7.1 : Dispositif expérimental de la calorimétrie	169
Figure 7.2 Dispositif expérimental de mesure de la quantité de chaleur	172
Figure 7.3 (a). Evolution de la température en fonction du temps (Ciment C1).	173
Figure 7.3 (b). Evolution de la température en fonction du temps pendant 24 heures (Ciment C1).	173
Figure 7.4 (a). Evolution de la température en fonction du temps (Ciment C2)	174
Figure 7.4 (b). Evolution de la température en fonction du temps pendant 24 heures (Ciment C2).	174
Figure 7.5 : Evolution de la chaleur dégagée pendant 24 heures d'hydratation (Ciment C1)	176
Figure 7.6 : Evolution de la chaleur dégagée pendant 24 heures d'hydratation (Ciment C2)	176
Figure 8.1 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M1 (C1)	178
Figure 8.2 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M2 (C1+7.5%FS)	179
Figure 8.3 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M3 (C1+10%FS)	180
Figure 8.4 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M7 (C1+7.5%HS)	180
Figure 8.5 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M8 (C1+10%HS)	181

Liste des figures (suite)

Figure 8.6 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M12 (C1+7.5%SS)	182
Figure 8.7: Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M13 (C1+10%SS)	182
Figure 8.8 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M4 (C2)	183
Figure 8.9 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M5 (C2-7.5%FS)	184
Figure 8.10 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M6 (C2-10%FS)	184
Figure 8.11 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M9 (C2-7.5%HS)	185
Figure 8.12 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M10 (C2-10%HS)	186
Figure 8.13 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M14 (C2-7.5%SS)	187
Figure 8.14 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M15 (C2-10%SS)	187
Figure 9.1 : Effet de NC sur le temps d'écoulement du mortier à base de ciment C1	194
Figure 9.2 : Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C1	194
Figure 9.3 : Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA combiné à 1% NC sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C1	194
Figure 9.4 : Effet de NC sur le temps d'écoulement du mortier à base de ciment C2	195
Figure 9.5 : Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C2	195
Figure 9.6: Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA combiné à 1% NC sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C2	195
Figure 9.7: Effet de NC sur le temps de prise du mortier Mo1-1	197
Figure 9.8 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1-1	197
Figure 9.9: Effet de NC sur le temps de prise du mortier Mo2-1	197
Figure 9.10: Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2-1	197
Figure 9.11: Effet de TEA sur le temps de prise du mortier Mo1	198
Figure 9.12 : Effet de TEA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1	198
Figure 9.13: Effet de TEA sur le temps de prise du mortier Mo2	198
Figure 9.14: Effet de TEA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2	198
Figure 9.15: Effet de TIPA sur le temps de prise du mortier Mo1	199
Figure 9.16: Effet de TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1	199
Figure 9.17: Effet de TIPA sur le temps de prise du mortier Mo2	200
Figure 9.18: Effet de TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2	200
Figure 9.19: Effet de combinaison NC+ TIPA sur le temps de prise du mortier Mo1	201
Figure 9.20: Effet de la combinaison NC+TEA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1	201
Figure 9.21: Effet de la combinaison NC+ TEA sur le temps de prise du mortier Mo2	202
Figure 9.22: Effet de la combinaison NC+ TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2	202
Figure 9.23 : Effet de la combinaison NC+TIPA sur le temps de prise du mortier Mo1	203
Figure 9.24 : Effet de la combinaison NC+TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1	203
Figure 9.25: Effet de la combinaison NC+ TIPA sur le temps de prise du mortier Mo2	203
Figure 9.26: Effet de la combinaison NC+ TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2	203

Figure 9.27: Comparaison entre l'effet de TEA et TIPA sur le temps de prise du mortier Mo1	204
Figure 9.28 : Comparaison entre l'effet de TEA et TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1	204
Figure 9.29: Comparaison entre l'effet de TEA et TIPA sur le temps de prise du mortier Mo2	205
Figure 9.30 : Comparaison entre l'effet de TEA et TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2	205

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison de différents accélérateurs sur le temps de fin de prise et la résistance à 3 et 28 jours d'un béton de rapport E/C=0.55 dosé à 310 kg de CPA-CEM I par m³ [28].	19
Tableau 2-1. Propriétés physiques et analyse chimique des ciments	30
Tableau 2.2 Combinaisons d'adjuvants	31
Tableau 2.3. Composition chimique de la fumée de silice	31
Tableau 2.4: Numérotation des mélanges	32
Tableau 4.1 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC	53
Tableau 4.2 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de NC	57
Tableau 4.3 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC	63
Tableau 4.4 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange a base de ciment C2 sous l'effet de NC	68
Tableau 5.1 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de TEA	76
Tableau 5.2 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de TEA	82
Tableau 5.3 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges a base de ciment C1, effet de TEA	90
Tableau 5.4 : Récapitulatif des résistances mécaniques a la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TEA	96
Tableau5.5 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de TIPA	103
Tableau5.6 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de TIPA	109
Tableau5.7 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges a base de ciment C1 sous l'effet de TIPA	116
Tableau5.8 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TIPA	122
Tableau 6.1 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de la combinaison NC+TEA	130
Tableau 6.2 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de la combinaison NC + TEA	136

Tableau 6.3 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de la combinaison de NC+ TEA	141
Tableau 6.4 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC+ TEA	146
Tableau 6-5 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de la combinaison NC+ TIPA	151
Tableau 6-6: Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de la combinaison NC+ TIPA	156
Tableau 6-7: Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC+ TIPA	161
Tableau 6.8: Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC+ TIPA	166
Tableau 9.1 : composition du mortier de référence	190
Tableau 9.2 Identification des mélanges de mortiers normalisés étudiés	191
Tableau 9.3 : Résultat des temps d'écoulement au maniabilimètre	193
Tableau 9.4 : Récapitulatif des résultats de prise et de résistance mécanique des différents mélanges de mortiers	196

NOTATIONS

C ($J.h^{-1}. ^\circ C^{-1}$) : la capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette

KSCN : Sulfocyanate de potassium

LiSCN : Sulfocyanate de lithium

m_s, m_e, m_b , étant respectivement les masses du sable, de l'eau et de la boîte à mortier vide

$m_c(g)$: la masse de ciment contenu dans l'éprouvette

Mnm : Mélange n° n pour la combinaison n° m

HS : mélange sable siliceux substitué au ciment – ciment, homogénéisé et rebroyé ensemble

SS : mélange sable siliceux broyé substitué au ciment- ciment

FS : fumée de silice

NaSCN : Sulfocyanate de sodium

NC : Nitrate de Calcium

R : Résistance mécanique en compression

Rréf : Résistance mécanique en compression de référence

T° : Température

T : Temps

Tdp : temps de début de prise

TEA : triéthanolamine

TfP : temps de fin de prise

TIPA : Triisopropanolamine

t (h) : la durée de l'hydratation,

α ($J.h^{-1}. ^\circ C^{-1}$) : le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre,

Θ ($^\circ C$) : l'échauffement de l'éprouvette, à l'instant t.

Δt_i = Temps (h) écoulé entre la mesure de l'échauffement à l'instant i et la mesure précédente à l'instant $i-1$

$\theta_{i,moy}$ = échauffement moyen ($^\circ C$) dans l'intervalle considéré,

$\alpha_{i,moy} = a + b.\theta_{i,moy}$ = Coefficient moyen de déperdition thermique totale du calorimètre dans ce même intervalle.

Résumé

La prévision de la résistance à court terme du béton est essentielle dans le domaine du génie civil. En effet la confection d'un béton ayant la meilleure résistance mécanique possible au jeune âge est nécessaire pour répondre aux impératifs de construction actuels (décoffrage rapide, mise en précontrainte le plus tôt possible, bétonnage par temps froid,...). Le développement de tels bétons passe, en général par l'utilisation d'adjuvants associés à des additions minérales pouzzoloniques parmi lesquelles la fumée de silice. Or ce sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages ferro-siliceux devient onéreux du fait de sa capacité limitée de production dans les pays industrialisés mais reste inexistant dans certains d'autres pays.

Dans ce travail de recherche, nous proposons d'autres substituts à la fumée de silice associés à des techniques de substitution particulières. En parallèle, nous proposons l'introduction, d'une combinaison d'adjuvants accélérateurs de prise-accélérateurs de durcissement afin de répondre aux objectifs d'améliorer des temps de prise et de durcissement du béton ainsi que de sa résistance mécanique au jeune âge.

Nos résultats montrent que l'utilisation d'alcanolamines combinées au nitrate de calcium dans des mélanges cimentaires comportant du sable siliceux broyé et homogénéisé avec le ciment conduit à une amélioration considérable des résistances mécaniques à toutes les échéances notamment aux très jeune âges (1 et 3 jours) et apporte une réduction importante des temps de prise. Nos résultats montrent que les performances obtenues dépendent également du type de ciment utilisé notamment de sa composition en ferro-aluminates.

Abstract

Predicting the short-term strength of concrete is essential in the field of civil engineering. To meet some building requirements (quick formwork removal, earlier prestressing, concreting in cold weather ...), it is necessary to make concrete that has the best possible mechanical strength at a young age. The development of this type of concrete requires generally the use of admixtures associated with pozzolanic mineral additions such as silica fume. However this by-product, from the silicon and silica-ferrites alloys industry, still has a high cost owing to its limited production in the industrialised countries and non-availability in the others countries.

In this research work, we propose others substitutes to silica fume and the use of special substitution techniques. In addition, combinations of setting and hardening accelerators are considered so as to improve both setting and hardening concrete time as well as the mechanical strength at early age.

The results obtained show that the use of alkanolamine combined with calcium nitrate in cement mixes containing siliceous sand grinded and homogenised with cement produced a significant improvement in the mechanical strength at all stages particularly in the early ages (1 and 3 days) and also provided an important reduction in the setting time. Our results indicate that these performances are also dependant on the type of cement used mainly its alumino-ferrites composition.

ملخص:

التنبؤ بمقاومة الخرسانة على المدى القصير أمر مهم في ميدان الهندسة المدنية. بالفعل، إن عملية إنجاز خرسانة ذات أحسن مقاومة ميكانيكية ممكنة في بداية العمر ضرورية لتلبية المتطلبات الحالية للبناء (سرعة نزع القوالب، تطبيق الإجهاد في أقرب وقت ممكن، صب الخرسانة في الطقس البارد،...). إن عملية تطوير هذا النوع من الخرسانة يتطلب في الغالب استعمال معززات مشتركة بإضافات من المعادن البزلونية مثل دخان الصوان. لكن هذا المنتج من صناعة السيليسيوم و المزيج من فيرو-سيليس أصبح باهظ الثمن لقلّة إنتاجه بالبلدان الصناعية و عدم وجوده بالبلدان الأخرى.

يتضمن هذا البحث اقتراحات لبدائل عن دخان الصوان بالإضافة إلى تقنيات خاصة لعملية التعويض. بالموازاة، نقترح كذلك إدخال معززات مسرعة الإمساك و مسرعة التجمد لتلبية متطلبات تحسين وقت الإمساك و التجمد للخرسانة إلى جانب المقاومة الميكانيكية في الأطوار الأولى من العمر.

النتائج المتحصّل عليها تظهر بأن استعمال الألكولامين بالتنسيق مع النترات للكسيوم في خلطات إسمنتية تتضمن رمل سيليسي مطحون و متجانس يؤدي إلى تحسن هائل في كل أطوار المقاومة الميكانيكية و خاصة في المدى القريب (1- 3 أيام) مع تخفيض مهم لوقت الإمساك. تبين النتائج المتحصّل عليها إرتباطها بنوعية الإسمنت المستعمل خاصة بنسبة مكونه من الفيرو-ألومينات.

INTRODUCTION GENERALE

Les bétons hydrauliques nécessitent toujours des temps d'attente pour qu'ils puissent acquérir leurs résistances finales par un durcissement naturel. Cela constitue l'un des principaux inconvénients dans l'utilisation de ce matériau. La notion " Economie " n'englobe pas seulement les gains en matériaux mais également les délais de réalisation ce qui rend les temps d'attente pour le durcissement naturel des bétons de plus en plus incompatibles avec les chantiers et les usines de préfabrication. L'accélération des cadences de travail imposée par les producteurs exige de trouver les moyens et les techniques nécessaires afin d'améliorer rapidement les temps de prise et de durcissement de ce matériau ainsi que sa résistance mécanique à la compression au jeune âge conduisant à l'élaboration de bétons à hautes performances (B.H.P). Ainsi depuis une vingtaine d'années ce matériau d'utilisation massive à l'échelle mondiale connaît un développement spectaculaire. Utilisés depuis longtemps dans les pays d'Amérique du nord et d'Europe, les bétons à hautes performances sont devenus d'usage courant dans la construction des ouvrages spéciaux (ponts, viaducs, centrales nucléaires etc....).

Cela nécessite évidemment des moyens qui permettent non seulement d'accélérer la prise mais également le durcissement. Si le traitement thermique reste le moyen le plus efficace pour obtenir les résistances critiques, il est très important de tenir compte des contraintes environnementales. Principalement dans les climats tel que le cas de l'Algérie, ce problème de l'augmentation de la résistance à très jeune âge a déjà été abordé et les résultats de récentes recherches ont montré que pour cela il suffisait de :

1. Diminuer autant que possible le rapport Eau/Liant en additionnant au liant des super plastifiants réducteurs d'eau,
2. Ajouter des matériaux pouzzolaniques dont la fumée de silice est le composé minéral récent le plus utilisé,
3. Sélectionner en un lieu donné le couple liant / fluidifiant le plus efficace tant du point de vue rhéologie (perte d'affaissement) que du point de vue résistance mécanique,
4. Trouver des granulats suffisamment résistants et adhérents pour retarder le plus possible l'apparition de fissures imprévisibles au sens de la mécanique de la rupture lorsque le béton est soumis à des efforts croissants.

L'obtention de bétons avec des résistances suffisantes aux jeunes âges nécessite évidemment des moyens parmi lesquels on peut citer :

1. L'emploi d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement,
2. La réduction de la quantité d'eau de gâchage associé à une mise en place appropriée,
3. L'essorage par aspiration de l'eau,
4. Le traitement thermique du béton.

De nombreux composés chimiques ont été utilisés comme accélérateurs de prise, le plus courant et le plus ancien étant le chlorure de calcium. Or l'utilisation de ce produit peut conduire à des problèmes de corrosion des aciers de béton armé et surtout précontraint. C'est ce qui a conduit de nombreux chercheurs à développer d'autres types d'adjuvants ne contenant pas de chlorure.

Dodson [1] a donné une synthèse de sels accélérateurs qui ne contiennent pas de chlorure et a découvert en 1968 que le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ vérifie les critères d'accélérateur de prise et constitue un inhibiteur de corrosion très efficace pour les aciers de béton. Il a été proposé en 1981 comme accélérateur de prise non corrosif dans les formulations de béton en conjonction avec la triéthanolamine.

Sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages ferro-siliceux, la fumée de silice a été utilisée comme matériau pouzzolanique ajouté au béton au début des années 70 en Norvège. La fumée de silice se présente sous forme de particules sphériques très fines, environ 100 fois plus petites que le ciment et elle est constituée presque entièrement de silice amorphe avec au minimum 90 % de SiO_2 . Son utilisation s'est répandue rapidement soit en remplacement partiel du ciment soit comme addition en vue d'améliorer certaines propriétés spécifiques. L'ajout de fumée de silice permet l'amélioration des propriétés mécaniques du béton (résistance en compression, traction, flexion, module d'élasticité, fluage, adhérence avec les aciers ...etc.). Cette amélioration est due à la diminution conséquente de la porosité capillaire induisant en particulier une faible perméabilité du béton aux flux gazeux ou liquide. La microstructure devient plus compacte ce qui accroît les performances du béton vis à vis des différentes attaques, Il en résulte donc des effets d'ordre physique ou mécanique dus à la finesse des matériaux et des effets chimiques consécutifs à la nature siliceuse amorphe.

L'amélioration des caractéristiques des bétons donc peut être atteinte par :

- le traitement thermique en choisissant bien comme il le faut un cycle d'étuvage mais ce mode peut provoquer des fissurations suite à un dysfonctionnement des électrovannes de vapeur ou le bouchage de certains orifices de la tuyauterie qui peut provoquer une mauvaise répartition de la chaleur sur les éléments à étuver. Ce procédé reste très coûteux suite à l'utilisation d'autres accessoires nécessitant beaucoup d'énergie.

- L'utilisation des additions minérales dont la fumée de silice est le produit le plus utilisé par les pays d'Amérique du nord et d'Europe mais ce produit nécessite l'utilisation de superplastifiants pour procurer au béton une certaine maniabilité. Son effet sur le jeune âge n'est pas favorable pour les éléments préfabriqués qui nécessitent un décoffrage rapide car il prolonge le temps de prise et par conséquent une chute de résistance à court terme, ajouté à tout cela son industrie est inexistante en Algérie et donc demande beaucoup de temps pour son importation avec des prix onéreux.
- L'utilisation des adjuvants accélérateurs de prise compatibles avec les ciments utilisés. Plusieurs chercheurs ont essayé des accélérateurs de prise tel que le chlorure de calcium, le nitrate de calcium, le formiate de calcium mais pour certains qui contiennent des ions chlorures leur utilisation se limite aux dallages en béton et aux éléments préfabriqués sans armatures.
- L'utilisation des adjuvants accélérateurs de durcissement tel que les alcanolamines mais généralement ces produits dont le dosage est très difficilement maîtrisable ajoutés individuellement n'ont pas d'effets sur l'amélioration des résistances au jeune âge par contre, leur effet est remarquable à moyen et long terme (au delà de 7 jours).

1. OBJET DE LA THESE

La caractérisation de la pâte de ciment ou du mortier de ciment au jeune âge nécessite sans doute de prendre en compte tous les paramètres susceptibles d'influer sur son comportement. Or, cela nécessite un très grand nombre d'essais qu'il nous est impossible d'étudier tous à la fois, de ce fait on s'est limité aux paramètres d'étude suivants ;

- ❖ Effet des additions minérales sur les caractéristiques de prise et durcissement des ciments,
- ❖ L'influence du nitrate de calcium sur le temps de prise et les résistances mécaniques des ciments de base et de ces mêmes ciments avec additions siliceuses en observant deux modes pour le sable siliceux : la substitution par du sable broyé d'une partie de ciment (**SS**) et le malaxage à sec et le rebroyage du mélange ciment-sable (**HS**),
- ❖ L'influence du dosage en triéthanolamine sur le temps de prise et les résistances mécaniques des ciments de base et de ces mêmes ciments avec additions siliceuses selon les deux modes précédents relatifs à l'introduction du sable siliceux,
- ❖ L'influence du dosage en triisopropanolamine sur le temps de prise et les résistances mécaniques des ciments de bases et de ces mêmes ciments avec additions siliceuses selon les deux modes précédents pour le sable siliceux,

- ❖ L'influence de la combinaison nitrate de calcium - alcanolamines sur le temps de prise et les résistances mécaniques des ciments de bases et de ces mêmes ciments avec additions siliceuses selon toujours les deux mêmes modes pour le sable siliceux,
- ❖ L'étude de l'effet des adjuvants (nitrate de calcium, alcanolamines et combinaison des deux) par la méthode de la calorimétrie semi adiabatique pour les ciments de base,
- ❖ Le développement de la même étude aux mortiers normalisés,
- ❖ Des conclusions et recommandations ainsi que des axes de recherche à développer.

2. CONTENU DE LA THESE

Le contenu de ce mémoire présente plusieurs aspects concernant la contribution à l'influence du nitrate de calcium et des alcanolamines sur les propriétés des pâtes et mortiers de ciment.

Après avoir revu dans les deux premiers chapitres les principaux travaux relatifs aux propriétés des pâtes et mortiers de ciment sous l'action des additions minérales, les accélérateurs de prise et de durcissement, et la définition des matériaux utilisés, des méthodologies d'essais et des mélanges étudiés, l'étude portera tout d'abord dans son troisième chapitre sur l'influence des additions siliceuses sur le temps de prise et le développement des résistances mécaniques en compression pour cela nous nous sommes intéressés à trois types d'additions la fumée de silice, le sable siliceux substitué au ciment puis homogénéisé et rebroyé (**HS**) et le sable siliceux broyé substitué au ciment (**SS**). Les ratios de 7, 10 et 15% du poids de ciment de sable siliceux broyé et de fumée de silice ont été utilisés pour cette analyse.

Le quatrième chapitre porte sur l'étude de l'influence du nitrate de calcium sur les temps de début et fin de prise ainsi que l'évolution des résistances mécaniques de deux ciments C1 et C2 et de ces mêmes ciments avec additions siliceuses. Les ciments C1 et C2 ont une surface spécifique comparable mais différent par leur composition minéralogique. Ces deux ciments proviennent de deux régions différentes situées à l'est de l'Algérie

Un dosage en nitrate de calcium de 1% du poids de ciment a été choisi pour cette partie de l'étude.

Le cinquième chapitre de ce travail est consacré à l'influence des alcanolamines et leurs dosages sur le temps de début et fin de prise ainsi que l'évolution des résistances mécaniques, les teneurs de 0.05% et 0.10% du poids de ciment, en triéthanolamine et en triisopropanolamine ont été prises en considération pour voir leur effets sur deux types de ciment. Ensuite on s'est intéressé à la même étude pour les mêmes ciments mais avec additions siliceuses, et nous comparons les effets des deux alcanolamines sur chaque type de ciment.

Dans le sixième chapitre nous nous sommes intéressé à l'influence de la combinaison du nitrate de calcium et de la triéthanolamine et de celle du nitrate de calcium et la triisopropanolamine sur les temps de prise et l'évolution des résistances mécaniques, avec les mêmes dosages prédéfinis aux chapitres deux et trois.

Dans le septième chapitre nous développons une étude de la calorimétrie des pâtes de ciment C1 et C2 avec l'addition du nitrate de calcium, de la triéthanolamine, et de leurs combinaisons.

Dans le huitième chapitre on a étendu l'étude pour les mortiers normalisés à partir des ciments de base C1 et C2. Pour cela on s'intéresse à l'effet du nitrate de calcium, de la triéthanolamine, de la triisopropanolamine et de leur combinaison sur la maniabilité, le temps de prise et l'évolution des résistances mécaniques.

Enfin nous terminons ce travail par des conclusions et proposons des axes de recherche qui restent à développer.

CHAPITRE1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 INTRODUCTION

L'objectif de cette synthèse bibliographique est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des adjuvants dans les matériaux cimentaires avec et sans additions minérales afin d'éclaircir en particulier la façon dont elles contribuent à l'activité liante du ciment et comment cette contribution liante est prise en compte dans les méthodes de formulation des mortiers ou des bétons.

Notre recherche bibliographique s'appuie sur les études les plus récentes dans le domaine ainsi que sur la normalisation européenne dont la lecture critique a permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous appuyons notre approche méthodologique pour la formulation des pâtes et mortiers de ciment.

Les données bibliographiques spécifiques concernant le rôle des adjuvants et additions minérales sur les propriétés physiques et de transfert des matériaux cimentaires sont présentées et analysées.

1.2 NOTIONS DE BASE

Le béton hydraulique est formé d'une pâte fluide (liant, eau, air occlus) enrobant des granulats. Si la résistance de ceux-ci est grande, la résistance du mélange ne dépendra que de la résistance de la pâte durcie. Cette résistance évolue en fonction du temps et de la température.

Suite aux contraintes économiques la fabrication de bétons à hautes résistances dans la réalisation d'ouvrages spéciaux est devenue à présent un fait courant dans les pays européens et en Amérique du nord. A cet effet, les producteurs cherchent à obtenir rapidement des résistances à la compression permettant de manipuler les pièces en béton sans nuire à leurs propriétés à long terme. Il est très important pour une entreprise de génie civil de savoir quand la résistance du béton est suffisante en toute partie de l'ouvrage pour le décoffrage ou le transfert de la précontrainte en toute sécurité le plus rapidement possible. C'est pourquoi aujourd'hui dans la majorité des pays du monde, un béton confectionné sans adjuvant est une exception. Par conséquent pour les usines de préfabrication et afin de rentabiliser les équipements des coffrages spéciaux (tunnel, glissant, grim pant, ...etc.) , on cherche à obtenir des résistances mécaniques qui permettent le décoffrage des ouvrages et la manutention des éléments au jeune âge sans aucun problème.

Il n'y a pas de définition précise du « jeune âge ». Ce terme peut signifier les premières heures, les premiers jours ou dans certains cas les premières semaines. Cela dépend du problème en question c'est-à-dire suivant le type de structure ainsi que les objectifs visés.

Dans la présente étude, nous adoptons la définition donnée par J. BYFORS [2] qui divise le processus de durcissement du béton en quatre phases (Fig. 2.1) :

- le béton frais,
- le béton au jeune âge,
- le béton en cours de durcissement,
- le béton durci.

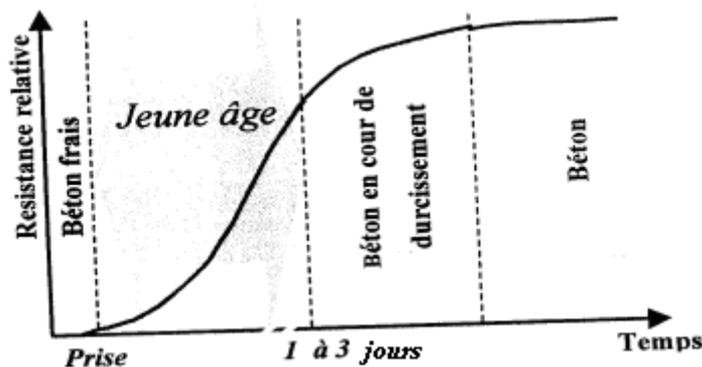


Figure 1.1: Représentation schématique du mécanisme de durcissement

Ainsi le jeune âge du béton débute avec le début de prise c'est-à-dire quelque heures après le gâchage lorsque les propriétés du matériau évoluent rapidement et se termine lorsque la cinétique d'évolution des propriétés du béton commence à décroître, (1 à 3 jours) pour un béton subissant un durcissement à 20°C.

Le domaine d'application des B.H.P et BTHP se développe rapidement et a atteint la totalité des constructions des immeubles préfabriqués en passant par les ponts à poutres précontraintes et les ouvrages spéciaux complexes [3].

Ce nouveau matériau (B.H.P) possède une bonne ouvrabilité et des propriétés mécaniques élevées donc une excellente durabilité. Il a été appliqué dans la construction de plusieurs immeuble à travers le monde [4,5], les qualités requises par les B.H.P n'ont pu être réalisées que grâce au développement de nombreux programmes de recherche conduits dans différents pays [5], dont les résultats ont permis aux techniciens de disposer de données permettant la conduite et la concrétisation des projets.

1.3 LES BETONS A HAUTES PERFORMANCES (B.H.P)

Les B.H.P ne cessent pas de se développer depuis de nombreuses années, ils peuvent être définis d'une manière très générale comme étant des bétons ayant des performances supérieures aux bétons courants. Ils présentent non seulement des résistances mécaniques plus élevées que celle des bétons courants mais aussi une bonne ouvrabilité et une bonne durabilité [7].

Auparavant le domaine des B.H.P commençait à 40 Mpa alors qu'aujourd'hui cette limite est passée aux environs de 50 à 80 Mpa. De plus il y est souvent associé une résistance aux jeunes âges (01 j) de 20 à 30 Mpa nécessaire au décoffrage et au transfert de la précontrainte des ouvrages préfabriqués [8].

En 1969 Parrott [9] avait montré qu'il était très possible de faire des bétons de résistance mécanique en compression après 28 jours d'âge de l'ordre de 80 Mpa avec un ciment classique, sans adjuvant en diminuant le plus possible le rapport eau/liant et en augmentant le dosage en liant. Par cet artifice on diminue la porosité initiale du matériau. Son inconvénient majeur était la très mauvaise ouvrabilité.

Parmi les très nombreuses études sur le B.H.P, on peut retenir celle de Yunsheng Zhang et al. [10] qui ont fait une étude sur la chaleur d'hydratation de la pâte de liant dans les bétons à haute performance. Ils ont utilisé comme liant un ciment 52,5, comme additions minérales les cendres volantes, les scories broyées des hauts fourneaux et la fumée de silice et comme super plastifiant le sulfonate de naphthalène en poudre. Ils ont conclu que :

- Le rapport eau/liant (E/L) est le facteur qui a le plus grand impact sur l'hydratation du liant.

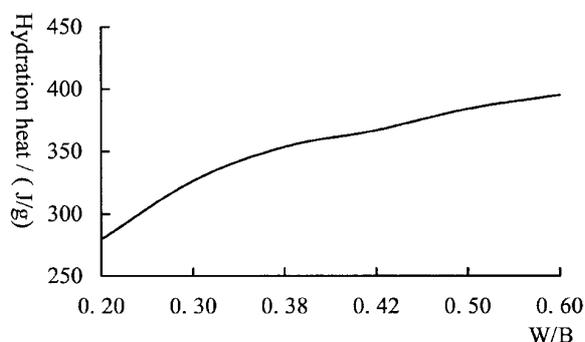


Figure 1.2 : Effet du rapport E/L sur la chaleur de trois jours d'hydrations des pâtes de liant

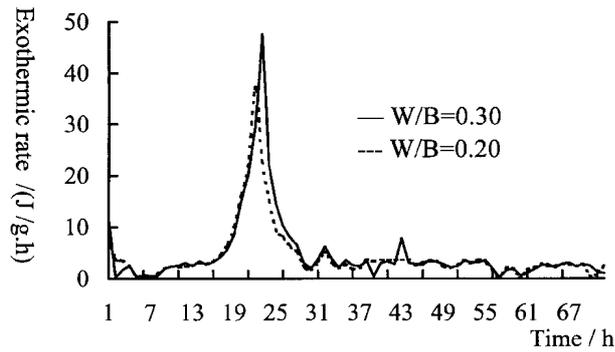


Figure 1.3 : Effet du rapport E/L sur le taux exothermique d'hydratation des pâtes

- La chaleur d'hydratation pendant les trois premiers jours n'a pas été réduite par la présence du super plastifiant contenant des composants retardateurs (type citrate), mais le processus de dégagement de la chaleur d'hydratation a été retardé.

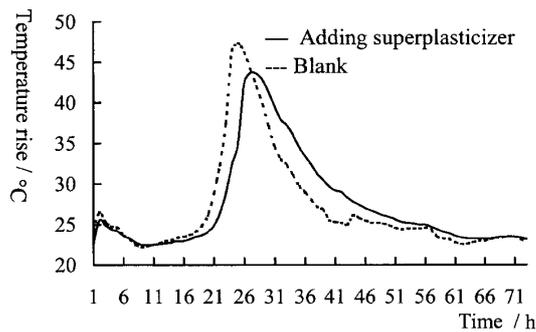


Figure 1.4 : Effets du superplastifiant sur l'élévation de la température des pâtes

- L'addition des composants minéraux a considérablement réduit la chaleur d'hydratation des trois premiers jours et le taux exothermique a retardé l'atteinte de la température la plus élevée de la pâte de liant.

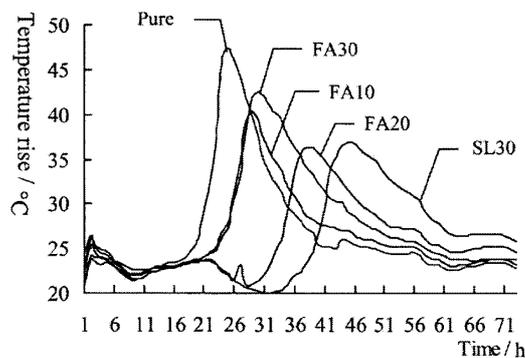


Figure 1.5 : Courbes de la température en fonction du temps pour les échantillons avec une seule addition minérale

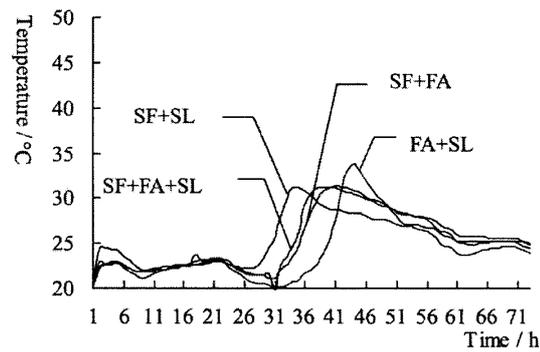


Figure 1.6 : Courbes de la température en fonction du temps pour les échantillons avec double et triple addition minérale

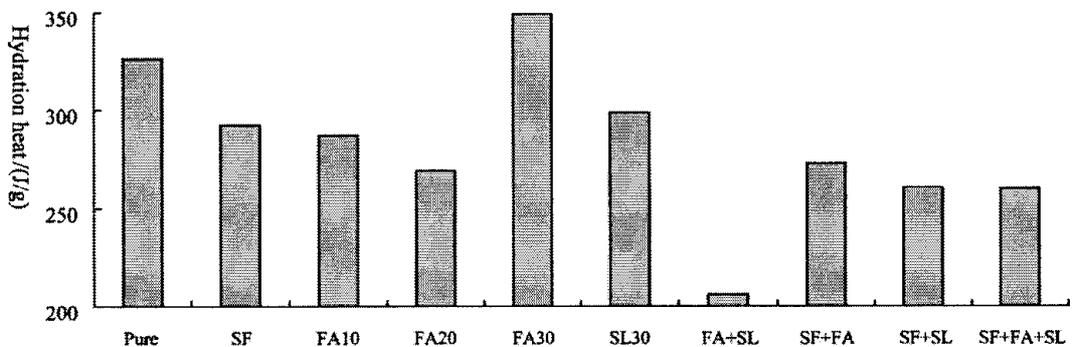


Figure 1.7 : Effet des combinaisons d'additions sur la chaleur d'hydratation pour une échéance de trois jours

1.3.1 OBTENTION DES B.H.P

Les bétons à hautes performances s'obtiennent grâce à une compacité optimale du matériau, la recherche d'un minimum de pores dans un béton, ne subissant aucun traitement particulier (thermique ou chimique), ce qui se traduit dans la pratique par la réduction du rapport pondéral eau sur liant, [11], comme l'avait déjà proposé Feret. Cette idée ancienne est rapidement limitée par le critère de mise en œuvre et même avec des moyens très puissants l'augmentation du volume d'air occlus dans les bétons et mortiers très raides limitait les performances mécaniques par suite de l'accroissement de la porosité.

Cependant l'utilisation d'adjuvants permettant de réduire le dosage en eau rend possible la réalisation de ces bétons avec les moyens traditionnels de chantier. L'efficacité de ces produits, obtenue grâce à la recherche continue dans cet axe, a permis la mise en œuvre de plastifiants réducteurs d'eau et de super-plastifiants hauts réducteurs d'eau. L'augmentation de la compacité du squelette solide pris dans son ensemble permet également de minimiser le rapport eau / liant pour une maniabilité donnée du béton [12].

On peut également accroître la compacité en insérant en plus des constituants traditionnels communs à tous les bétons, en particulier des ultrafines dont les plus utilisées sont les cendres volantes et la fumée de silice [13].

Les B.H.P sont déjà intégrés au moins partiellement dans la réglementation française : les règles BAEL91 et BPEL 91 voient en effet leur domaine d'application étendu aux béton B60 ($f_{c28} = 60$ Mpa).

Une classification indicative des bétons selon leurs résistances mécaniques à la compression fait apparaître trois catégories de béton :

- Béton ordinaire (B.O) $20 \text{ Mpa} \leq f_{c28} < 50 \text{ Mpa}$
- Bétons a hautes performances (B.H.P) $50 \leq f_{c28} \leq 80 \text{ Mpa}$
- Bétons à très hautes performances (BTPH) $80 > f_{c28} \leq 150 \text{ Mpa}$

1.3.2 RESISTANCE EN COMPRESSION DES BHP (NOTION DE RESISTANCE CRITIQUE)

Les résistances critiques recherchées au jeune âge (à court terme) sont les résistances nécessaires et suffisantes qui permettent aux pièces en béton d'être manipulées sans risque de déformation.

D'après J.BRESON [14], ces résistances varient selon la forme, la nature et la destination des pièces en béton.

Elles sont telles que :

- ✓ Dans le cas de manutention ou de démoulage, la résistance varie selon le produit et les moyens de manutention utilisés, elle est de 2 à 3 Mpa pour les blocs en béton, de 5 à 10 Mpa pour les canalisations et les bordures, de 10 à 15 Mpa pour les produits de grandes dimensions tels que les panneaux préfabriqués. Toutes ces valeurs doivent représenter au moins 20 à 30 % de la résistance à 28 jours.
- ✓ Dans le cas de la précontrainte par pré-tension les résistances nécessaires au relâchement des aciers actifs sont de l'ordre de 25 à 35 Mpa soit 50 à 60 % de la résistance à 28 jours.
- ✓ Dans le cas des produits soumis à un traitement mécanique d'aspect ou à des contraintes élevées lors de leurs démoulages, la résistance recherchée est également de l'ordre de 50 à 60% de celle à 28 jours.

La résistance à la compression est la plus importante des propriétés d'usage du matériau et celle dont l'amélioration est la plus spectaculaire. Elle traduit directement les effets des ajouts, des additions et des adjuvants sur la microstructure du matériau.

Chapitre1

Si l'on cherche à fabriquer des B.H.P maniables avec des granulats ordinaires, on doit se limiter dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 et 120 Mpa en terme de résistance moyenne à 28 jours.

La résistance à la compression simple (uni axiale) constitue le paramètre le plus communément utilisé pour caractériser le béton. Sa valeur dépend des dimensions des échantillons testés, de l'âge et des conditions de mûrissement.

SELLEVOLD et RADJY [15,16] montrent que l'augmentation de la résistance en compression en fonction du rapport E/C reste à peu près semblable mais atteint un niveau plus élevé quand la fumée de silice est combinée au ciment.

CARETTE ET MALHOTRA [17] font une synthèse de la résistance à la compression de béton représentant un rapport $[E/(C+FS)]$ de 0.4 dans laquelle ils ont montré qu'en rajoutant entre 5 et 20% de fumée de silice combinée à une quantité variable de superplastifiant, afin de conserver l'ouvrabilité, la résistance à la compression à 28 jours reste la même.

Dans la même période les travaux de SELLEVOLD et RADJY ont porté sur l'augmentation de la résistance à la compression des bétons aux fumées de silice ayant subi une cure dans l'eau et des blocs témoins exposés à l'air du laboratoire immédiatement après le décoffrage. Les éprouvettes subissent une perte de résistance de 10 à 20% lorsqu'elles sont soumises à un séchage précoce, comparées à celles qui ont subi une cure dans l'eau. On observe que la perte de résistance en fonction du rapport E/C est un peu plus grande dans les bétons avec ajout de fumée de silice que dans les bétons témoins correspondants.

1.4 ACTION DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de Février 2002 définit les additions comme des « matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ».

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés [18]. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de « supplementary cementitious materials ». De plus, ces

différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée, rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires. Toutefois, pour une première analyse de l'action des additions minérales, nous pourrions distinguer trois principaux effets [19, 20] :

- ✓ un effet granulaire engendré par la capacité d'empilement des particules de l'addition et par l'intensité des frictions entre les particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange. Cet effet agit essentiellement sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais et peut influencer sur le développement et l'intensité des deux autres effets des additions.
- ✓ un effet physico-chimique et microstructural engendré par les interactions entre les particules de l'addition et l'évolution du processus d'hydratation du ciment ainsi que par les modifications de la structuration de la matrice cimentaire. Il agit sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires.
- ✓ un effet chimique engendré par la capacité de certaines additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir en milieu cimentaire. Il agit sur le volume et la nature des produits hydratés formés. Cet effet est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Ils peuvent donc être associés dans une notion unique plus large qui est celle de la contribution des additions à l'activité liante du ciment.

Par ailleurs, la normalisation actuelle distingue les additions en deux types : celles quasiment inertes (de type I) et celles à caractères pouzzolaniques ou à caractères hydrauliques latent (de type II). Elle permet la prise en compte dans la formulation de certaines additions en présence de ciments de type CEM I par le biais d'un coefficient forfaitaire k . Cependant, elle ne propose pas de méthodologie expérimentale permettant d'élargir le concept de coefficient k à de nouveaux couples ciment addition. A l'issue de notre analyse critique des textes normatifs et des études actuelles sur la prise en compte des additions minérales dans la formulation, il est montré que l'évaluation quantitative précise de la contribution liante des additions rend nécessaire la maîtrise de l'effet granulaire et le maintien de la compacité du squelette solide des mélanges lorsque des additions sont introduites.

1.5 LES ADJUVANTS

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant la mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Chapitre1

Généralement le béton définitif d'un ouvrage n'est pas forcément satisfaisant, même si sa composition a été déterminée suivant les règles connues fixant les proportions respectives de liant, de sable, de granulats et d'eau. Bien des facteurs interviennent au stade de sa fabrication, de son transport, de sa mise en place dans les coffrages, de sa prise et de sa montée en résistance.

Diverses solutions existent pour augmenter la possibilité d'arriver à un résultat concret, parmi lesquelles celles apportées par les adjuvants.

Quel que soit l'adjuvant, les spécifications normatives visent d'abord à définir et à quantifier sa fonction, c'est-à-dire la façon dont il modifie, dans le sens recherché, les propriétés du béton, ensuite, à limiter les effets non recherchés sur les autres propriétés du béton [21].

1.5.1 INTERET DES ADJUVANTS

La raison de l'utilisation croissante des adjuvants est qu'elle confère physiquement et économiquement au béton des avantages considérables. Ces avantages comprennent, entre autres, l'utilisation de béton dans des conditions qui présentaient auparavant des difficultés considérables, voire insurmontables. Ils permettent l'utilisation d'une grande gamme de matériaux dans le béton.

Même s'ils ne sont pas toujours bon marché, les adjuvants ne représentent pas nécessairement des dépenses supplémentaires, car leur utilisation peut engendrer des économies, par exemple sur les coûts du serrage et du dosage en ciment ou encore en augmentant la durabilité des bétons sans dispositions supplémentaires ultérieures.

Les adjuvants fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur formulation au temps froid et au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Ce sont eux qui ont rendu possible la notion et le concept actuel de béton à hautes performances [22].

Il y a toutefois lieu d'insister sur le fait que, même utilisés de manière adéquate et bénéfique pour le béton, ils ne peuvent en aucun cas servir à corriger la mauvaise qualité des autres constituants ni leur dosage incorrect, ni des erreurs de manutention lors du transport, de la mise en place ou du serrage du béton.

1.5.2 DIFFERENTS TYPES D'ADJUVANTS

Les adjuvants peuvent être organiques ou inorganiques selon leur composition chimique, mais leur caractère chimique, distinct de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du béton, est

essentiel. Ainsi , dans la nomenclature américaine on les appelle adjuvants chimiques, mais ici cette qualification est superflue, car les produits minéraux incorporés dans le béton, dont la teneur est souvent supérieure à 5% de la masse du ciment, sont appelés liants ou ajouts.

Les adjuvants sont habituellement classés selon leur fonction dans le béton, mais en plus ils présentent souvent des effets secondaires. Selon la norme ASTM C 494-92, on peut classer les adjuvants dans les catégories suivantes :

- ✓ Type A : réducteurs d'eau ;
- ✓ Type B : retardateurs ;
- ✓ Type C : accélérateurs ;
- ✓ Type D : réducteurs d'eau et retardateurs ;
- ✓ Type E : réducteurs d'eau et accélérateurs ;
- ✓ Type F : haut-réducteurs d'eau ou superplastifiants ;
- ✓ Type G : haut-réducteurs d'eau et retardateurs, ou superplastifiants et retardateurs

La norme européenne qui traite des adjuvants est la norme EN 934-2.

1) LES SUPERPLASTIFIANTS HAUTS REDUCTEURS D'EAU

Les super-plastifiants sont des dispersants qui fonctionnent sur le même principe que les plastifiants réducteurs d'eau mais d'une façon plus efficace, telle qu'il est possible en principe de défloculer complètement les grains. Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton.

D'après la norme NF-P 18-333 un superplastifiant est un adjuvant fluidifiant qui introduit dans un béton, mortier ou coulis, en général peu avant sa mise en œuvre, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. L'écart minimal entre l'affaissement au cône d'Abrams du béton fluidifié et celui du béton témoin est égal à 8 cm.

Il n'existe pas de B.H.P sans superplastifiants. En effet c'est grâce aux super-plastifiants qu'on arrive à fabriquer des B.H.P. La facilité de réaliser un béton à hautes performances sur chantier dépend essentiellement du comportement du couple liant / superplastifiant.

Au début de leur apparition vers la fin des années 1970, les superplastifiants ont été surtout utilisés pour fluidifier des bétons courants. Ils étaient alors ajoutés, sur chantier, à des dosages de l'ordre d'un à deux litres par mètre cube soit 0,2 à 0,3 % en masse d'extrait sec par rapport à la masse du liant.

A de tels dosages, l'action fluidifiante est limitée dans le temps car les molécules de polymères ne se trouvent pas en nombre suffisant pour neutraliser tous les sites actifs libérés suite à la meilleure dispersion des grains de ciment comme le montre la figure 2.9 d'après Jolicœur et al [23].

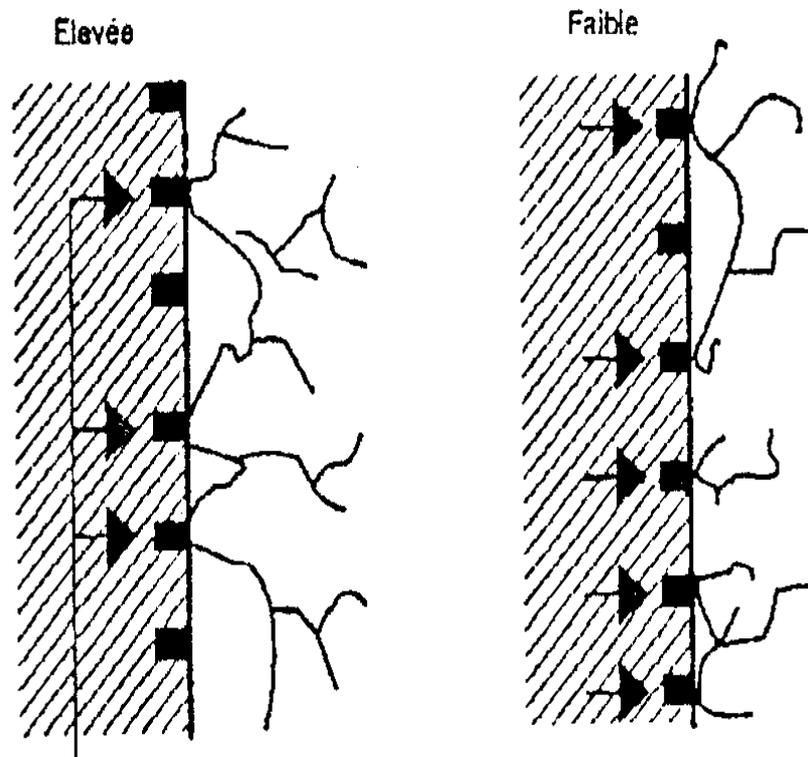


Figure 1.8: Illustration schématique du blocage des sites réactifs par les molécules d'un super plastifiant

Les superplastifiants disponibles actuellement sur le marché sont élaborés à partir de résines de synthèse à masses moléculaires élevées rentrant dans les catégories suivantes :

- Condensat de mélamine sulfonée de formaldéhyde,
- Condensat de naphtalène sulfoné de formaldéhyde,
- Ligno-sulfonates de calcium ou de sodium modifié,
- Autres (carbo-hydrates, résines vinyliques.....).

D'après Aïtcin [24], lorsqu'on utilise ces super-plastifiants à de très forts dosages, cet effet enveloppant peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment, quelle que soit la nature du super plastifiant, du type de ciment ou de la dimension moyenne de ses grains.

Aïtcin [25] dans la même période a mis en évidence l'allongement de la période dormante en étudiant l'évolution de la chaleur dégagée lors de la réaction d'hydratation. A cet effet plus le dosage en superplastifiant est élevé plus cet effet retardateur sera prononcé.

La figure 2.10 montre d'après Fernom [26] que certaines molécules de polymères, peuvent être aussi très vite fixées par les hydrates qui se forment.

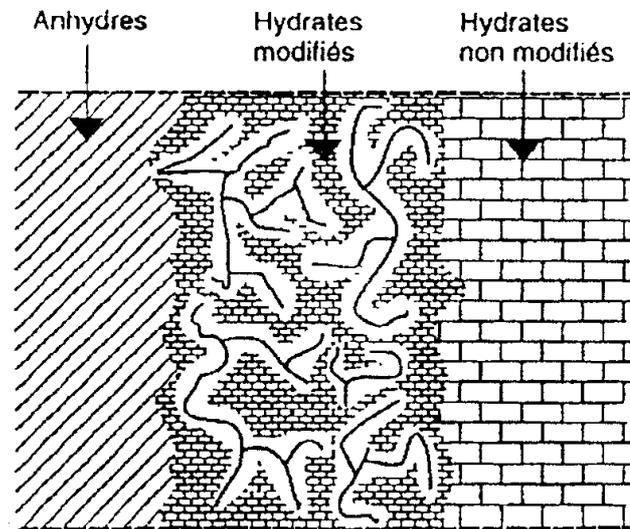


Figure 1..9: Illustration schématique de l'influence des super plastifiants sur la formation des hydrates

2) ACCELERATEURS DE PRISE ET DE DURCISSEMENT

Selon la norme européenne EN934-2, un adjuvant sera classé comme accélérateur de prise performant si :

- Le temps de prise à 20°C est ≥ 30 mn et $\leq 60\%$ du temps de prise du mélange de référence à 5°C (EN 480-2),
- La résistance à la compression du béton est $\geq 80\%$ de la résistance du mélange de référence à 28 jours,
- La résistance à 90 jours \geq à la résistance à 28 jours,
- La quantité d'air dans le béton frais $\leq 2\%$ du volume du mélange de référence (sauf en cas de spécifications du fabricant),

Les exigences de performance pour un test d'accélérateur de durcissement d'un mélange selon cette même norme EN 934-2 sont les suivantes :

- La résistance à la compression du béton à 24h et à 20°C doit être $\geq 120\%$ de la résistance du mélange de référence et $\geq 130\%$ de la résistance du mélange de référence à 48h et à 5°C,

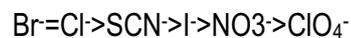
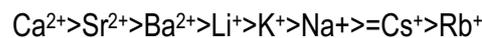
Chapitre1

- La quantité d'air dans le béton frais doit être $\leq 2\%$ du volume du mélange de référence (sauf en cas de spécifications du fabricant).

a) mécanismes d'action

Les accélérateurs de prise et de durcissement sont, en général, des sels minéraux. De nombreux composés chimiques ont été utilisés comme accélérateurs de prise, le plus ancien et le plus connu étant le chlorure de calcium. On admet généralement que le chlorure de calcium favorise la croissance du silicate de calcium hydraté C-S-H. Or l'utilisation de ce produit conduit à des problèmes de corrosion des armatures. C'est ce qui a conduit de nombreux chercheurs à développer d'autres types d'adjuvants ne contenant pas de chlorure [27].

De nombreuses études ont montré que, d'une manière générale, les cations et les anions présentaient un effet accélérateur suivant vraisemblablement le même mécanisme sans être toutefois aussi efficaces que le chlorure de calcium ; ce sont, dans l'ordre d'efficacité [28] :



D'autres ions sont susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse de prise du ciment par précipitation d'une nouvelle phase ; ce sont des hydroxydes ou des sels basiques de magnésium, de zinc, de plomb ou des sels peu solubles de calcium, sulfates, carbonates, phosphates, fluorures et borates [29]. Mais l'effet peut être une accélération ou un retard. Les sels de magnésium ont un effet accélérateur semblable à celui des sels de calcium. Les carbonates peuvent provoquer une prise très rapide ou bien la retarder suivant la concentration à laquelle ils sont ajoutés. Ces produits ne sont pas utilisés en pratique car leur action est difficile à maîtriser.

b) Eléments de typologie des accélérateurs de prise et de durcissement

Le chlorure de calcium (CaCl_2) demeure sans contestation l'accélérateur de prise et de durcissement le plus puissant, le plus économique et le plus utilisé [30], même si son emploi est réglementé plus ou moins sévèrement selon les pays à cause de ses problèmes de corrosion.

Cependant, en matière d'accélération du durcissement du béton, on oublie trop souvent que l'on peut obtenir des gains de résistance substantiels à très court terme 18 à 24 heures, en diminuant tout

simplement le rapport eau/liant du béton. Il est, en effet, tout à fait possible d'obtenir des résistances supérieures à 20 MPa en moins de 18 heures sans chauffer le béton, tout simplement en diminuant le rapport eau/liant entre 0.3 et 0.35.

La limitation du taux de chlorure dans les bétons a conduit à développer des accélérateurs non chlorés. Ces adjuvants, indispensables en raison de ces limitations, sont, en général, un peu moins efficaces à dosage égal que le chlorure de calcium, ceci avec le classement des anions et des cations donné précédemment.

Adjuvant	Dosage*	Diminution du temps de fin de prise (min)	Accroissement de la résistance à la compression**	
			3jours	28jours
Chlorure de calcium CaCl_2	1.0%	90	136	109
	2.0%	125	148	102
Nitrite de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$	1.0%	65	128	113
	2.0%	95	137	112
Formiate de calcium $\text{Ca}(\text{HCO}_2)_2$	1.0%	70	123	115
	2.0%	100	133	105

Tableau 1.1 : Comparaison de différents accélérateurs sur le temps de fin de prise et la résistance à 3 et 28 jours d'un béton de rapport E/C=0.55 dosé à 310 kg de CPA-CEM I par m³ [28].

* % de sel anhydre par rapport à la masse du ciment

** en % par rapport à la résistance du béton de référence à la même échéance

Bien que les résultats donnés par les fournisseurs d'adjuvants permettent la comparaison objective des différents produits du marché, il reste néanmoins qu'aujourd'hui le seul moyen vraiment fiable d'évaluer l'efficacité d'un accélérateur consiste à effectuer des essais sur le béton étudié dans les conditions d'utilisation identiques à celles du chantier.

En effet, l'action effective d'un accélérateur dans le béton dépend de plusieurs facteurs qu'on ne sait pas bien prendre en compte dans la formulation des bétons, à savoir :

- ✓ Les classes de résistance à 28 jours et au jeune âge du ciment ;
- ✓ La composition minéralogique du clinker ;
- ✓ Le type de ciment ;
- ✓ L'interaction avec d'autres adjuvants ;
- ✓ La température.

La figure 2.10 montre l'influence d'un accélérateur de prise commercial non chloré sur le temps de prise et la résistance à la compression à court terme mesurée sur un mortier normalisé conservé à 5° et 20°C. Le ciment utilisé est un CPA-CEM I 42.5 PM / ES. Bien que ces résultats montrent l'efficacité de l'accélérateur à 5°C, il reste que les résistances mesurées à 5°C sur les mortiers sont très nettement inférieures à celles mesurées à 20°C sur les mortiers sans accélérateur. Dans ce cas, l'accélérateur ne permet pas de compenser l'influence de la température sur les résistances à court terme.

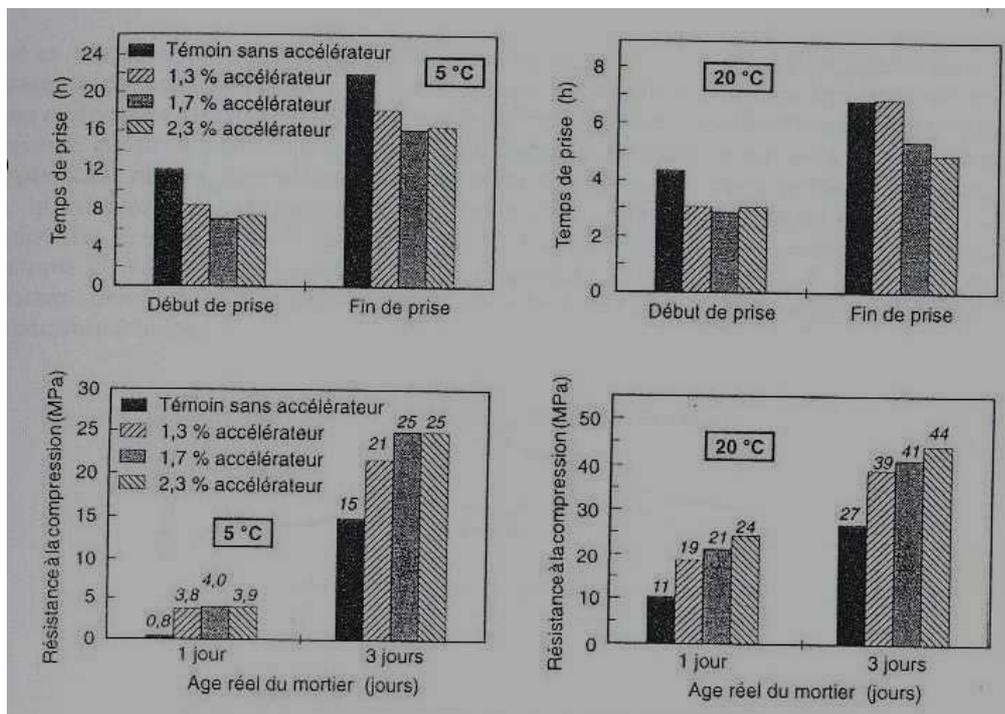


Figure 1.10 : Influence d'un accélérateur de prise sur le temps de prise et la résistance à la compression à court terme mesurée sur un mortier normalisé conservé à 5 et 20°C

La figure 2.11 illustre l'influence du ciment sur l'efficacité d'un accélérateur de prise normalisé et non chloré. L'analyse rapide de ces résultats tend à montrer que l'accélérateur utilisé serait plus efficace pour le béton de CPJ-CEM 42.5 R que pour celui de CPA-CEM I 52.5 R. Cependant il serait tout à fait injustifié de faire cette analyse sur la seule base des résultats présentés sur cette figure. En effet, il s'agit là d'un exemple où, pour être valable, la comparaison des deux bétons doit absolument se faire pour des maturités équivalentes [31]. Dans ce cas précis, si l'on exprime la maturité relative des deux bétons témoins, à l'âge de 16 heures, par rapport de leur résistance à 16 heures sur la résistance respective à 28 jours, on obtient [32, 33,34]:

- ✓ Pour le béton témoin de CPA-CEM I 52.5 R \Rightarrow maturité = 0.51
- ✓ Pour le béton témoin de CPJ-CEM II 42.5 R \Rightarrow maturité = 0.26

Pratiquement ces valeurs de maturité relative indiquent qu'à 16 heures le béton de CPJ-CEM II 42.5 R est certainement dans sa période de durcissement rapide, appelée court terme où l'évolution des résistances est très forte, alors que le béton de CPA-CEM I 52.5 R semble sorti de cette période et connaît donc un accroissement des résistances en fonction du temps beaucoup plus modéré. Ceci est confirmé par l'augmentation relative nettement plus forte, entre 16 et 20 heures, des résistances du béton témoin de CPJ-CEM II 42.5 R, comparativement à celles du béton témoins de CPA-CEM I 52.5.

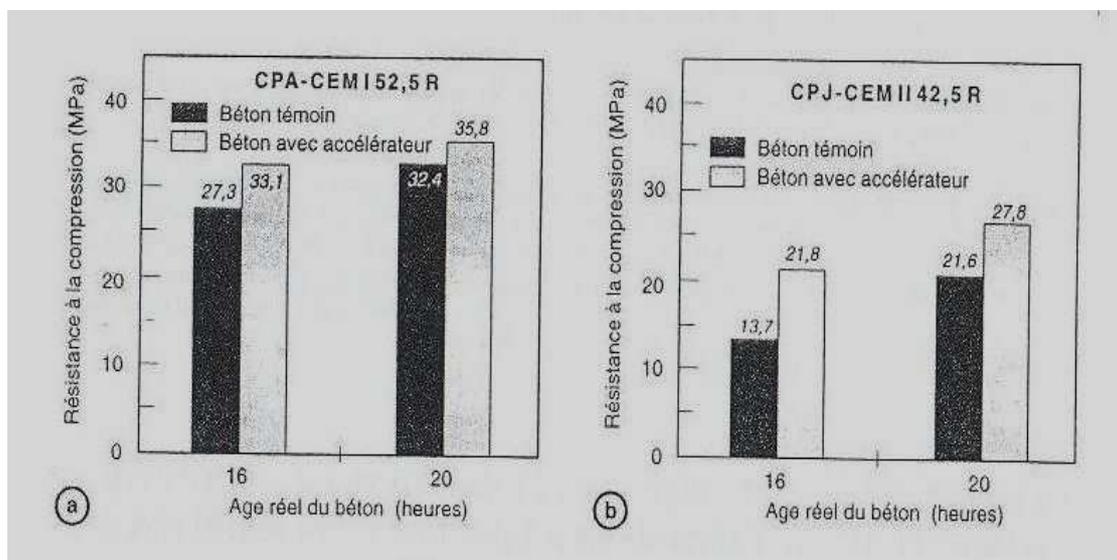


Figure 1.11: Résistance à la compression, à 16 et à 20 heures, de bétons avec et sans accélérateur

Une analyse plus objective [35] de l'efficacité de l'accélérateur vis-à-vis de ces deux bétons peut être faite en comparant l'évolution de la température enregistrée au cœur des éprouvettes des bétons témoins et des bétons avec accélérateurs. La figure 2.12 montre que dans les conditions étudiées, l'accélérateur utilisé ne réduit pas la période dormante des deux bétons, mais qu'il accélère l'hydratation du ciment au cours de la période de durcissement du béton. Sur la base de ces relevés de température, il semble que l'accélérateur étudié ait effectivement plus d'influence sur le béton de CPJ-CEM II 42.5 R que sur le béton de CPA-CEM I 52.5 R.

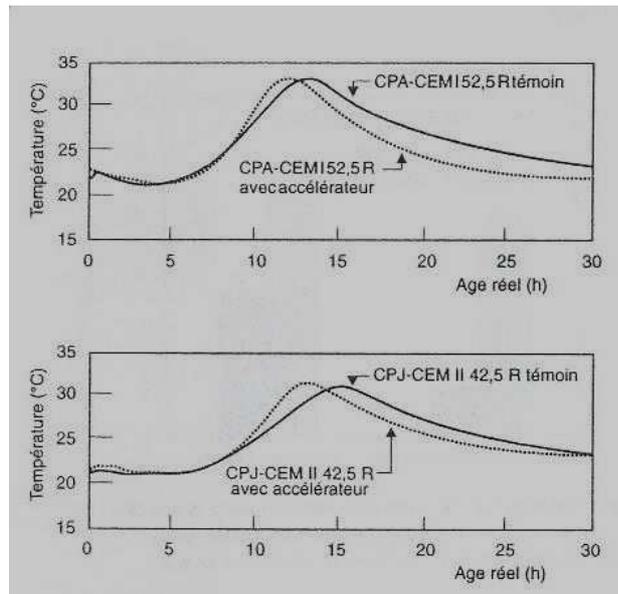


Figure 1.12: Evolution de la température mesurée au cœur d'éprouvettes 16x32cm

Dodson [36], par exemple, a présenté une synthèse de sels accélérateurs de prise non corrosifs, ne contenant pas de chlorures. Il a commencé ses recherches en 1962 et a montré que le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ peut être utilisé comme accélérateur de prise [37].

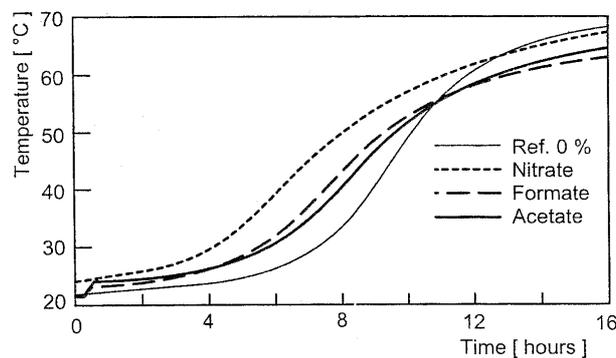


Figure 1.13 : Courbe Température / temps de durcissement pour des bétons avec des dosages équivalents de nitrate, d'acétate soluble et de formiate de fer de calcium comparé au béton de référence

Le nitrate de calcium (NC) a été officiellement utilisé en 1968 et breveté en 1969 [38]. Ce n'est donc qu'après cinq ans de recherche qu'il a été prouvé que le nitrate de calcium est un inhibiteur de corrosion efficace pour les aciers de béton armé et béton précontraint.

Le seul autre composé organique utilisé comme accélérateur de prise est la triéthanolamine (TEA). Cependant, son dosage est critique car la triéthanolamine peut aussi agir comme un puissant retardateur ou encore peut promouvoir des situations de prise éclair. En général des dosages de 0.01% à 0.025% d'extrait sec par rapport à la masse du ciment permettent d'accélérer la prise et le durcissement du béton de façon significative. Cependant, il est bon de rappeler que l'on utilise très

rarement la triéthanolamine seule en tant qu'accélérateur ; on l'utilise pratiquement exclusivement pour corriger l'action retardatrice des réducteurs d'eau ou des superplastifiants [39].

En 1976 V.S RAMACHANDRAN [40] a étudié le rôle de la triéthanolamine (TEA) dans l'hydratation du ciment. A cet effet il a essayé des addition de 0.1, 0.25, 0.35, 0.5 et 1% de TEA par rapport au poids du ciment. Ses résultats montrent que l'addition de petites quantités de TEA n'a pratiquement aucun effet sur le temps de prise, le développement de la chaleur d'hydratation et le développement des résistances mécaniques dans les pâtes de ciment portland. Cependant, pour des quantités supérieures à 0.1% son influence est très significative, il agit en tant que retardateur dans l'hydratation de la phase de silicates et comme accélérateur dans la phase d'aluminates. Le mécanisme de cette action peut être dû à la formation d'un complexe entre le TEA et les composants d'hydratation du ciment portland. Son mécanisme sur l'hydratation du ciment n'est pas complètement compris. En 1986 PAURI et al [41] ont trouvé des résultats semblables pour le silicate tricalcique.

En 1992 V.T YLLMAZ et al. [42] ont développé une nouvelle méthode se basant sur des techniques d'analyse polarographique pour la détermination quantitative de TEA dans la phase aqueuse des ciments. Le TEA en solution est converti en complexe de TEA-Fe³⁺ en ajoutant une mole NaOH à 10% Fe³⁺ en solution. L'application de cette méthode d'analyse a montré que le TEA est absorbé par l'hydratation initiale produite par la quantité d'aluminate tricalcique et de gypse et la quantité de TEA absorbée est de 1.5 mg par gramme de solide.

Dans la même période, d'autres études [43, 44, 45] ont montré que certains pays d'Europe du Nord utilisent aussi un sel cristallisé de nitrate à base de calcium et d'ammonium comme adjuvant pour les bétons.

L'influence des ajouts en nitrate de calcium sur la prise du ciment et la corrosion des aciers à 20°C a été étudiée récemment par H.Justnes [46, 47,48]. Dans un premier temps, H.Justnes constate que l'effet d'accélération de prise s'il existe, dépend du taux en aluminates dans le ciment. Cette hypothèse n'est pas vérifiée pour les ciments à basse température (5°C). Il conclut que le nitrate de calcium fonctionne comme un accélérateur de prise pour le ciment entre 7°C et 20°C. L'efficacité du nitrate de calcium dépend du type de ciment auquel il est ajouté. Cette caractéristique d'accélération semble croître avec le taux de bélite des ciments ou avec d'autres caractéristiques qui conduisent à la formation de bélite au cours du processus de clinkérisation [49].

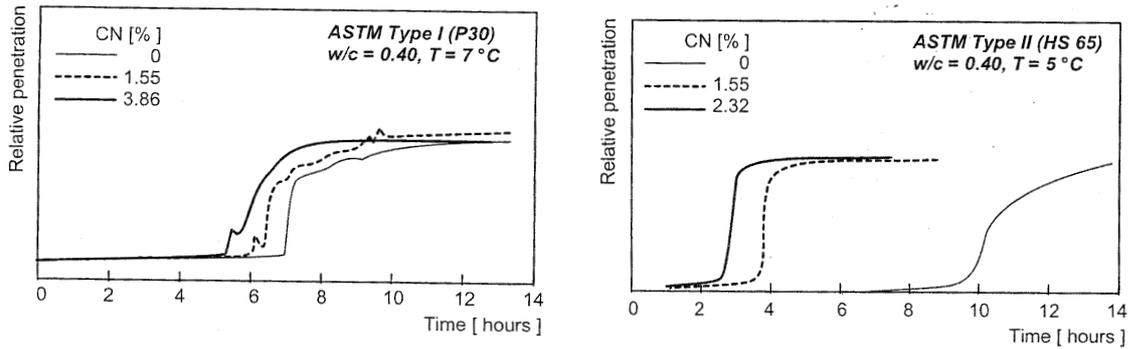


Figure 1.14: Les profils de pénétration de l'aiguille de Vicat dans les pâtes de ciment du type I & II de l'ASTM avec différents Dosages de CN à 5°C et 7°C [43]

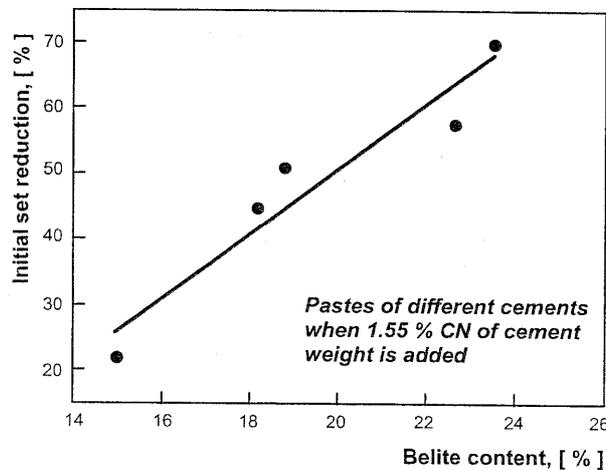


Figure 1.15 : La corrélation linéaire entre l'efficacité d'accélération de 1,55 % d'additions de CN sur différents ciments et leur teneur de bélite à 5°C [43]

Par ailleurs, la triéthanolamine en ajout avec le nitrate de calcium a été proposée en 1981 comme un accélérateur de prise non corrosif pour les bétons. Ce produit chimique accélère la réaction entre l'aluminate tricalcique et le gypse ; utilisée aux dosages de 0.1 à 0.5% du poids du ciment, elle provoque la prise immédiate (de 2 à 6 minutes) du mélange.

Ellis Gartner et David Myers [50] ont étudié les effets physiques et chimiques de petites additions de deux alcanolamines tertiaires différentes sur le ciment Portland. Les résistances d'essai sur des mortiers normalisés pour des échéances de plus de 1 jour se sont avérées augmentées dans certains cas par l'addition de la triisopropanolamine (TIPA) [51], mais pas par les quantités semblables de triéthanolamine. Les données thermo gravimétriques et de diffraction aux rayons X indiquent que les résistances accrues de mortier ont résulté d'un plus grand degré d'hydratation du ciment. L'analyse de la calorimétrie et la phase aqueuse prouvent que l'alcanolamine le plus puissant, la triisopropanolamine, reste en solution pendant un temps suffisant pour catalyser l'hydratation de C_4AF après que tout le gypse libre ait été consommé sous forme d'hydrates de sulfoaluminate de calcium. En revanche,

l'alcanolamine le moins puissant, la triéthanolamine, est la plupart du temps adsorbée par le ciment dans les premières heures de l'hydratation. On présume que le mécanisme catalytique facilite le transport des ions ferriques dans la phase aqueuse sous forme de complexes ferriques alcanolamines.

En 1995 T. Sage et al. [51] ont étudié l'effet des sulfocyanates sur l'hydratation du ciment portland à basses températures. Le sulfocyanate de sodium, le sulfocyanate de potassium, le sulfocyanate d'ammonium, le sulfocyanate de calcium et le sulfocyanate de lithium ont été ajoutés au ciment Portland dans les quantités 1,5 et 3% (par rapport au poids du ciment) et traités aux températures de 20 et -5°C . Tous les sulfocyanates activent le début de réaction du ciment à 20°C et l'accélération la plus efficace se produit avec 3% $\text{Ca}(\text{SCN})_2$. La chaleur d'hydratation dans les échantillons contenant KSCN est de 30% supérieure que celle du mélange de référence à 3 jours. A 0°C il y a une accélération en présence des thiocyanates et la chaleur d'hydratation était plus élevée dans tous les échantillons contenant des thiocyanates. Tous les thiocyanates accélèrent l'hydratation à -5°C en ce qui concerne la pâte de référence. L'échantillon de référence n'a montré pratiquement aucune hydratation même jusqu'à 4 jours alors que l'eau dans les pores restait congelée. Certains gels se sont produits en présence de NH_4SCN , LiSCN et 1.5 % $\text{Ca}(\text{SCN})_2$.

Le thiocyanate de calcium accélère le développement de l'hydratation et de la résistance dans la pâte à toutes les températures de traitement. C'est le thiocyanate qui est le plus efficace pour l'augmentation des résistances à basses températures, après 28 jours de cure à -5°C . La pâte de ciment avec 3% de sulfocyanate de calcium atteint une résistance qui représente 74% de la résistance de la pâte de ciment traitée au sulfocyanate à 20°C . Le sel de sodium est également un accélérateur efficace, il augmente la résistance à de basses températures. Les sulfocyanates les moins efficaces en ce qui concerne le développement des résistances à -5°C sont LiSCN , KSCN et NaSCN à un dosage de 1,5%.

Un rapport linéaire existe entre la quantité de chaux formée et la résistance, dans la marge des périodes de cure étudiées. Cependant, quand la résistance est comparée avec le même degré d'hydratation (en terme de chaux formée), quelques pâtes montrent des résistances meilleures que d'autres.

Les résistances relatives, semblent donc dépendre davantage de la microstructure des pâtes que du degré d'hydratation. Au même degré d'hydratation à -5°C , 1,5 – 3% de thiocyanate de calcium ou 3 % de sulfocyanates de Na, de K et de Li montrent de meilleures résistances que ceux qui contiennent 1,5% sulfocyanates de sodium (Na), de lithium (Li) et de potassium (K).

1.6 CONCLUSION

L'optimisation des opérations de chantier se traduit de plus en plus souvent par des exigences sur la résistance à la compression à court terme (jeune âge). L'exécution en toute sécurité de ces opérations de construction nécessite que les exigences spécifiées par les bureaux d'études et les maîtres d'ouvrages soient réellement atteintes dans les ouvrages quelles que soient les conditions environnementales qui prévalent.

Afin de régler les performances à court terme du béton certains chercheurs jugent que nous disposons de moyens classiques tels que le choix des constituants (gravier, sable et eau) ou d'autres moyens plus modernes tels que l'introduction d'additions minérales et siliceuses en substitution à une partie du ciment ou encore faire appel à des adjuvants ou encore une combinaison des différentes situations tout en veillant à la compatibilité des différents constituants.

Les adjuvants sont nécessaires pour la confection des bétons modernes. Ils permettent de modifier certaines propriétés du béton à l'état frais et durci. En dispersant des grains de ciment et autres fines on peut, soit réduire la demande en eau, soit à dosage en eau constant améliorer la fluidité du béton. Plusieurs types de molécules organiques ou inorganiques peuvent être utilisées pour obtenir de tels résultats selon des mécanismes qui diffèrent les uns des autres légèrement, mais qui consistent essentiellement à neutraliser les nombreuses charges électriques attachées sur les particules de ciment suite à son opération de broyage.

L'utilisation des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement modifie le cours de la réaction d'hydratation du ciment en accélérant la prise de quelques heures et en augmentant la vitesse d'évolution des résistances mécaniques.

Le dosage en adjuvant se fait par des essais, en se basant sur les recommandations du fabricant car une adaptation est toujours nécessaire en fonction du ciment, de la présence ou non d'additions et ajouts, de la température de mise en œuvre, etc. En outre le dosage optimal en adjuvant est fonction de l'efficacité du système de malaxage utilisé, ainsi que de la séquence d'introduction des adjuvants.

Le chlorure de calcium (CaCl_2) demeure sans contestation l'accélérateur de prise et de durcissement le plus puissant, le plus économique et le plus utilisé, même si son emploi est réglementé plus ou moins sévèrement selon les pays, alors que son utilisation dans le cas des bétons précontraints est strictement interdite. Cette restriction a conduit les chercheurs à développer des accélérateurs non chlorés mais qui sont moins efficaces à dosage égal que le chlorure de calcium surtout dans leurs utilisations séparées.

Il a été montré que le nitrate de calcium est un inhibiteur de corrosion très efficace pouvant jouer le rôle d'accélérateur de prise malgré son prix plus élevé que le chlorure de calcium. Son efficacité

dépend du type de ciment auquel il est rajouté et de l'augmentation du taux de bélite (C_2S) pour des températures variant entre 5 et 7 °C et du taux en aluminates (C_3A) pour des condition de température de 20 °C \pm 1 °C.

D'autres composés organiques qui font partie de la famille des alcanolamines peuvent être utilisés comme adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement. Le plus utilisé est la triéthanolamine. Cependant son dosage est très critique car il peut agir comme un retardateur puissant ou encore peut promouvoir des situations de prise éclair. C'est pourquoi son utilisation seule est très rare en tant qu'accélérateur. On l'utilise pratiquement exclusivement pour corriger l'action des autres adjuvants tels que l'effet de durcissement dans le cas de la conjonction avec le nitrate de calcium.

Le second composé organique utilisé fortement en tant qu'accélérateur de durcissement est la triisopropanolamine qui a les mêmes effets que la triéthanolamine mais étant donnée sa structure moléculaire plus développée son efficacité sur certains ciments est plus accentuée.

A travers notre recherche bibliographique, il apparaît qu'afin d'améliorer la résistance au jeune âge des pâtes, mortiers de ciment et bétons certains chercheurs se sont penchés beaucoup plus sur l'effet positif des adjuvants incorporé individuellement sur les pâtes, mortiers et bétons de ciment ainsi que sur leurs modes d'introduction et leurs dosages. D'autres se sont intéressés aux additions minérales et siliceuses en présence de superplastifiants ou de plastifiants réducteurs d'eau. Dans ce cas la fumée de silice est aussi le produit minéral le plus utilisé chez les pays développés afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du béton. Seulement du point de vue économique son prix reste élevé et son industrie dans certains pays reste peu développée.

Notre travail de recherche consiste à étudier la contribution du nitrate de calcium seul et combiné à la triéthanolamine et la triisopropanolamine, sur le temps de prise et le développement des résistances mécaniques des pâtes et mortiers de ciment. Le dosage du nitrate de calcium a été pris égal à 1% du poids de ciment, pour les alcanolamines deux dosages ont été pris en considération à savoir 0.05% et 0.10% du poids de ciment.

Deux ciments, C1 riche en aluminates (C_3A) et C2 riche en ferrites (C_4AF), ont été utilisés dans cette étude. Ces deux ciments proviennent de deux régions différentes situées à l'est de l'Algérie. A ces deux ciments nous avons substitué du sable siliceux à des taux de 7.5%, 10% et 15% et de la fumée de silice avec des teneurs de 7.5 et 10%. Deux modes d'introduction du sable siliceux ont été conduit : une substitution de sable siliceux broyé à une finesse équivalente à celle du ciment et le malaxage du sable siliceux substitué au ciment puis le rebroyage du mélange à la même finesse que le ciment de base. Ainsi nous obtenons pour cette étude 15 mélanges et 10 combinaisons d'adjuvants. Cette étude a ensuite été étendue aux mortiers normalisés confectionnés à partir des deux ciments de base C1 et C2. Des essais calorimétriques ont été réalisés uniquement pour les différentes

Chapitre1

combinaisons du ciment C2. L'objectif est de confronter les résultats des essais mécaniques en compression et les essais de prise avec ceux de la chaleur d'hydratation pour ces mélanges.

CHAPITRE 2 ETUDE EXPERIMENTALE

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous définissons la composition et la provenance des matériaux utilisés pour la réalisation de ce travail, Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes. Enfin, nous listons les différents mélanges étudiés.

2.2 MATERIAUX UTILISES

Pour la réalisation de ce travail nous avons utilisé deux types de ciment (notés C1 et C2). Ces derniers proviennent de deux régions différentes situées à l'est de l'Algérie. Le ciment C1 provient de la cimenterie de Ain Touta de la wilaya de Batna. Le ciment C2 provient de la cimenterie de Ain Kebira de la wilaya de Sétif.

Les propriétés physiques et l'analyse chimique de ces deux ciments (C1 et C2) sont indiquées dans le Tableau 2.1. Ces deux ciments diffèrent par leur taux en aluminates (C_3A) et en bélite (C_2S) mais ont une surface spécifique et une teneur en alite [silicate tricalcique (C_3S)] comparables.

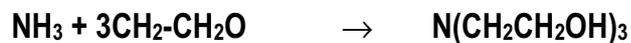
	Ciment 1 (C1)	Ciment 2 (C2)
Composition chimique	%	%
CaO	64.36	63.91
SiO ₂	22.00	21.62
Al ₂ O ₃	5.02	4.49
Fe ₂ O ₃	2.94	5.37
SO ₃	1.94	1.92
MgO	2.07	1.66
K ₂ O	0.47	0.25
Na ₂ O	0.26	0.08
Composition minéralogique (BOGUE)	%	%
C ₃ S (Alite)	51.28	52.48
C ₂ S (Bélite)	24.68	22.69
C ₃ A (Aluminates)	8.33	2.82
C ₄ AF (Ferrite)	8.94	16.32
Propriétés physiques		
Perte au feu	0.64	0.81
Surface Blaine	352.0 m ² /kg	332.0 m ² /kg

Tableau 2-1. Propriétés physiques et analyse chimique des ciments

Le nitrate de calcium utilisé comme accélérateur de prise dans cette étude présente la formule générale: $X.NH_4 NO_3 Y.Ca (NO_3)_2 Z.H_2O$. Les coefficients X, Y et Z ont pour valeurs respectivement 0.092, 0.500 et 0.826 ce qui correspond à 19.00% Ca²⁺, 1.57 NH₄⁺, 64.68 % NO₃⁻ et 14.10 % H₂O.

La formule chimique de la triéthanolamine (TEA) est : $N (CH_2CH_2OH)_3 [C_6H_{15}O_3N]$. Celle de la triisopropanolamine (TIPA) est $N(CH_2CH_2CH_2OH)_3 [C_9H_{21}O_3N]$. Ces deux produits ont été utilisés pour leur critère d'accélérateur de durcissement. Ils sont tout les deux solubles dans l'eau.

La triéthanolamine est produite par la réaction de l'ammoniac sur l'oxyde d'éthylène selon la réaction suivante :



Chapitre 2

Les combinaisons considérées dans notre étude pour ces adjuvants sont celles indiquées dans le tableau 2.2.

N°combinaison d'adjuvants (m)	% NC	% TEA	% TIPA
0	0	0.00	0.00
1	1	0.00	0.00
2	0	0.05	0.00
3	1	0.05	0.00
4	0	0.10	0.00
5	1	0.10	0.00
6	0	0.00	0.05
7	1	0.00	0.05
8	0	0.00	0.10
9	1	0.00	0.10

Tableau 2.2 : Combinaisons d'adjuvants (% en poids du ciment)

La fumée de silice utilisée dans notre étude provient de l'usine de Chambéry (France), sa composition chimique est donnée dans le tableau 2.3. Conformément à la norme NF P18-502, la fumée de silice présente une densité de 2.1, une masse volumique apparente de 2240 kg/m³, une surface spécifique de 600 kg/m³ et une surface spécifique BET de 18,2 cm².

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O ₃	Si	Perte au feu
% Oxydes	89	0,3	0,9	0,3	1,5	1,7	0,3	0,6	3,2	2,2

Tableau 2.3. Composition chimique de la fumée de silice.

Nous avons également utilisé du sable siliceux. Ce dernier contient 92 à 95% de silice et provient de la sablière de Skikda située à l'est de l'Algérie.

Le rapport eau/ciment (E/C) pour les différents mélanges est égal à 0.3. Les différents mélanges étudiés sont présentés dans le tableau 2.5 ils sont désignés par M_{n-m} où n indique le numéro du mélange et le type de ciment (Tableau 2.4) et m indique la combinaison d'adjuvant qui lui est associé (Tableau 2.2).

Les mélanges à base de ciment C1 sont : M1 ; M2 ; M3 ; M7 ; M8 ; M12 et M13

Les mélanges à base de ciment C2 sont : M4 ; M5 ; M6 ; M9 ; M10 ; M14 et M15

N° Mélange	Type de ciment	% FS*	% HS**	% SS**
M1	C1	/	/	/
M2		7.50	/	/
M3		10	/	/
M7		/	7.50	/
M8		/	10	/
M12		/	/	7.50
M13		/	/	10
M4	C2	/	/	/
M5		7.50	/	/
M6		10	/	/
M9		/	7.50	/
M10		/	10	/
M14		/	/	7.50
M15		/	/	10

Tableau 2.4: Numérotation des mélanges

* FS : fumée de silice

** Le sable « SS » est un sable siliceux broyé seul ensuite substitué partiellement au ciment. En revanche le sable « HS » est un sable siliceux qui est substitué au ciment puis le mélange ciment-sable substitué subit un malaxage-broyage. La finesse de broyage dans les deux cas (sable seul (SS) et mélange ciment-sable (HS) est équivalente à celle du ciment de base.

2.3 METHODES D'ESSAIS

2.3.1 Essai de prise

Les essais de prise ont été réalisés à l'aide de l'appareil de Vicat selon la norme EN196-3. Dans cet essai la prise est mesurée en enfonçant une aiguille à section transversale constante dans la pâte du mélange considéré et on relève la hauteur d'enfoncement de l'aiguille à chaque pas de temps (t). Le temps de début de prise (Tdp) est celui relatif au moment où l'aiguille ne peut plus s'enfoncer complètement alors que le temps de fin de prise (Tfp) est celui correspondant au moment où l'aiguille ne peut plus pénétrer à travers la pâte. Cet essai a été réalisé à l'aide d'un appareil automatique programmé pour effectuer une chute avec une période de temps (t), Figure 2.1.

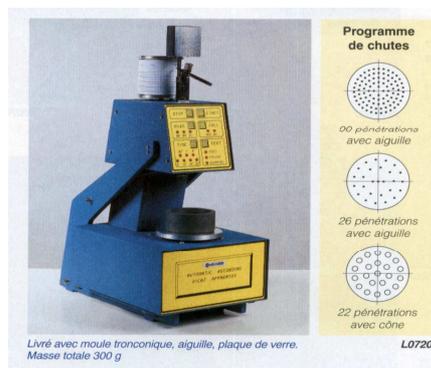


Figure 2.1 : Appareil de Vicat automatique

2.3.2 Essai de résistance mécanique

Le critère de durcissement a été apprécié à l'aide des essais de résistance en compression simple sur des éprouvettes de dimension $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Ces dernières ont été coulées et conservées dans des moules métalliques, pendant 24 heures à la température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et à l'humidité relative de $55 \pm 5\%$, puis immergées dans l'eau à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ jusqu'à l'échéance fixée. Elles sont ensuite sollicitées en compression simple à l'aide d'une presse hydraulique (figure 2.2). L'essai a été effectué selon la norme NF18-406. Chaque valeur de résistance en compression représente la moyenne des résultats correspondant à 3 échantillons testés.



Figure 2.2 : Dispositif de mesure de la résistance
(Presse hydraulique)

2.3.3 Essai de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments

a) Principe de l'essai

Cet essai a été effectué selon la norme française NF P 15-436. L'essai a pour but la mesure continue de la chaleur d'hydratation des ciments au cours des premiers jours. La quantité de chaleur s'exprime en joule par gramme de ciment.

Le principe de cette méthode consiste à introduire une éprouvette de ciment (mortier) dès la gâchée, dans un vase de Dewar afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. A une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenue dans

Chapitre 2

l'éprouvette est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le vase de Dewar et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant depuis l'instant initial.

L'échauffement du mortier, fonction principalement de la nature du ciment, est généralement compris entre 10° et 50°C par contre celui d'une pâte pure de ciment est compris entre 20° et 120°C.

b) Appareillage de mesure

Le banc de mesure comporte deux calorimètres semi adiabatiques dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesure multivoies à microprocesseur permettant de mémoriser les températures en cours d'essai (Figure 2.3).



Figure 2.3 Dispositif expérimental de mesure de la quantité de chaleur

CHAPITRE 3 INFLUENCE DES ADDITIONS ET SUBSTITUTIONS SILICEUSES SUR LES TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANIQUES DES PATES DE CIMENTS DE BASES

Dans l'activation chimique des réactions initiales d'hydratation du ciment nous nous sommes intéressés tout d'abord à l'action même de fines minérales en ajout au mélange de base. En effet plusieurs auteurs dont E.H.Kadri et R.Duval [53,54] ont récemment montré que les réactions d'hydratation du ciment au très jeune âge peuvent être activées par l'addition de composés chimiques minéraux sous forme de poudres très fines. Disposant facilement de ce matériau, nous avons utilisé des fines siliceuses sous forme de fumée de silice et de sable siliceux broyé. En ce qui concerne le sable siliceux, deux modes opératoires ont été expérimentés. Dans le premier cas, le sable siliceux broyé finement est substitué partiellement au ciment (notation SS) tandis que dans la deuxième opération le sable est substitué au ciment puis le mélange ciment-sable substitué subit un malaxage-broyage de façon à obtenir une poudre de finesse équivalente à celle du ciment de base (notation HS). Cette idée a été inspirée d'une étude jordanienne réalisée en 2000 par Mohamed-Rasoul Suliman et al. [55].

Les pâtes sont réalisées à partir de mélanges comportant des teneurs variables en additions siliceuses (7.5, 10, et 15%). Les additions siliceuses sont ajoutées en substitution du ciment avec un rapport eau sur liant constant de 0.30.

3.1 EFFET DE LA FUMEE DE SILICE (FS) SUR LE TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANIQUES.

La fumée de silice est substituée au ciment à des teneurs respectives de 7.5% et 10% en poids.

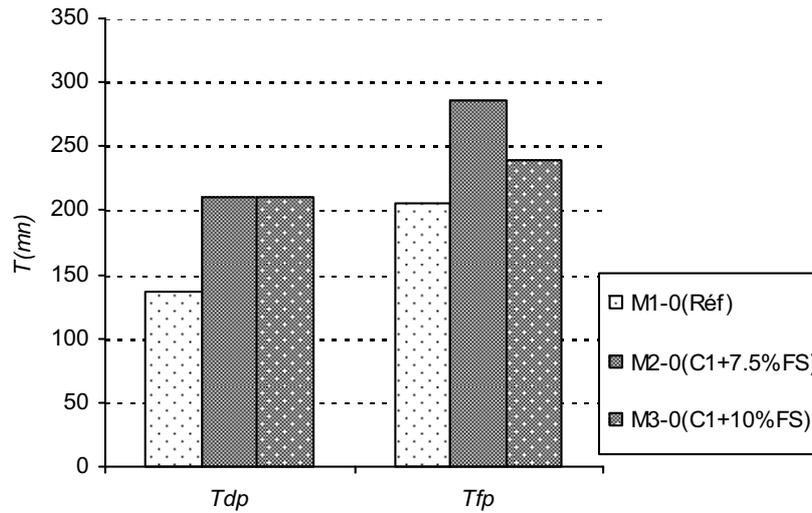


Figure 3.1: Effet de la fumée de silice sur le temps de prise des mélanges à base de ciment C1

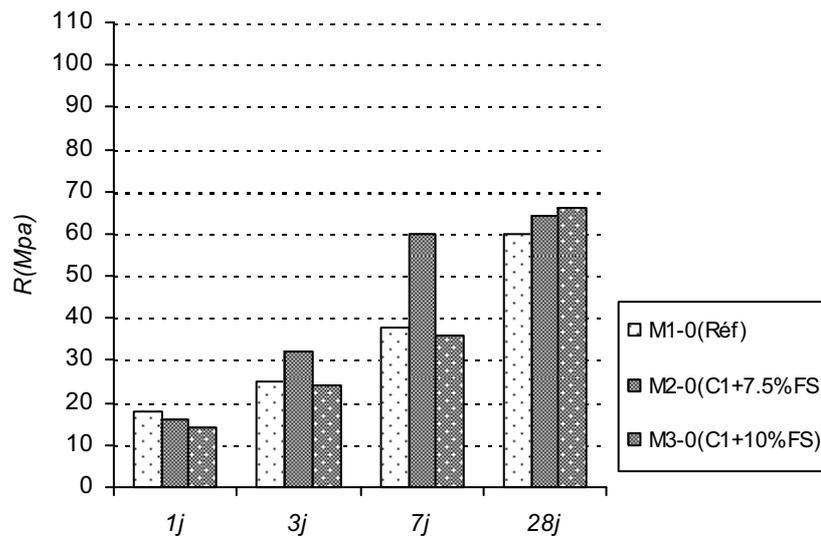


Figure 3.2 : Effet de la fumée de silice sur l'évolution des résistances des mélanges à base de ciment C1

En ce qui concerne le ciment C1, la figure 3.1 montre que l'introduction de la fumée de silice aux teneurs indiquées ralentit le début de prise de l'ordre de 50% environ et la fin de prise de 25%.

Pour les résistances mécaniques (fig. 3.2), à très court terme (1j), la résistance diminue avec l'introduction de la fumée de silice, mais à partir de 3 jours pour la teneur de 7.5% de fumée

de silice et à long terme pour celle à 10%, la résistance en compression devient supérieure à celle du mélange de base.

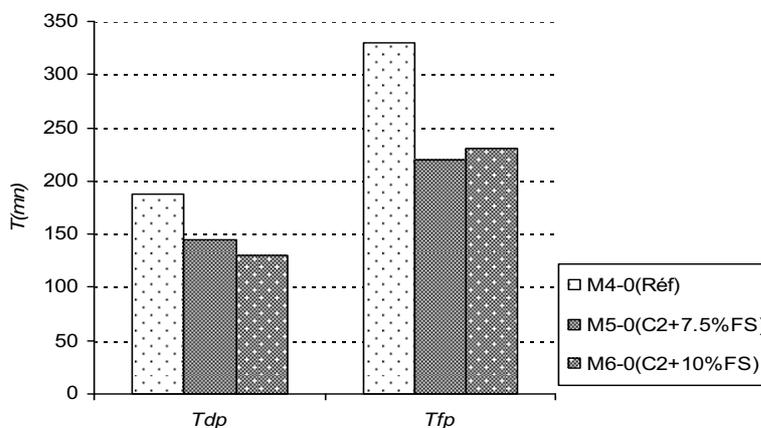


Figure 3.3 : Effet de la fumée de silice sur le temps de prise des mélanges à base de ciment C2

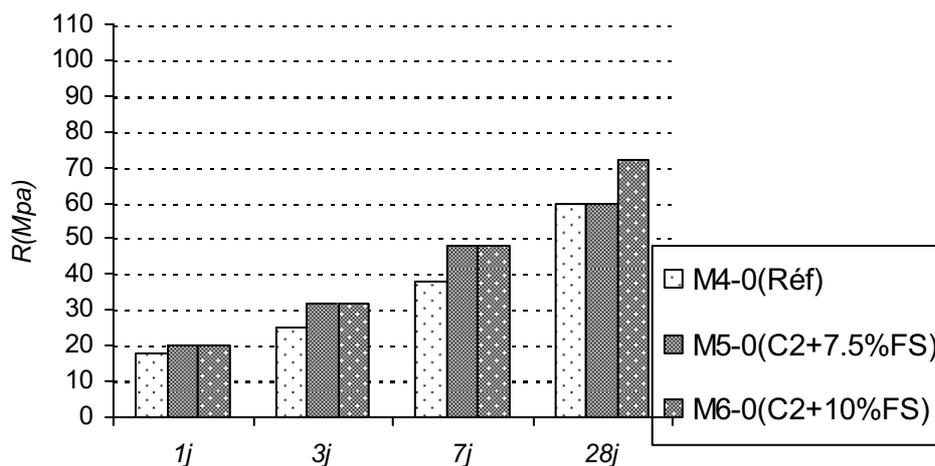


Figure 3.4 : Effet de la fumée de silice sur l'évolution des résistances des mélanges à base de ciment C2

Pour le ciment C2, on constate sur la figure 3.3, qu'à l'inverse du ciment C1, le temps de début de prise ainsi que le temps de fin de prise sont réduits de l'ordre de 30% lorsqu'on introduit la fumée de silice.

Cette diminution du temps de prise conduit à une amélioration des résistances mécaniques à très court terme (1 jour) contrairement à ce qui se passe pour le ciment C1. A toutes les échéances, les résistances des mélanges aux fumées de silice sont supérieures à celles du mélange de référence.

3.2 EFFET DE L'HOMOGENÉISATION SABLE SILICEUX (HS) SUR LE EMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANIQUES

Le sable siliceux broyé est introduit dans les mélanges aux teneurs de 7.5%, 10% et éventuellement 15%.

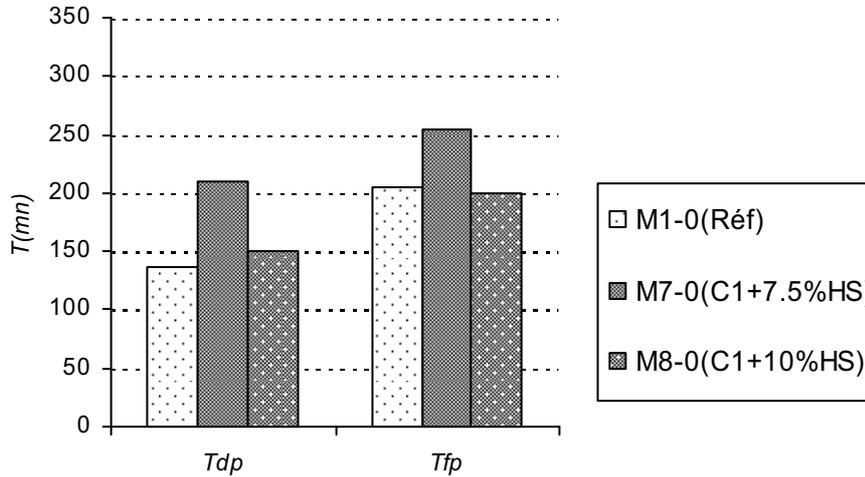


Figure 3.5 : Effet de l'homogénéisation sable- ciment C1 sur le temps de prise

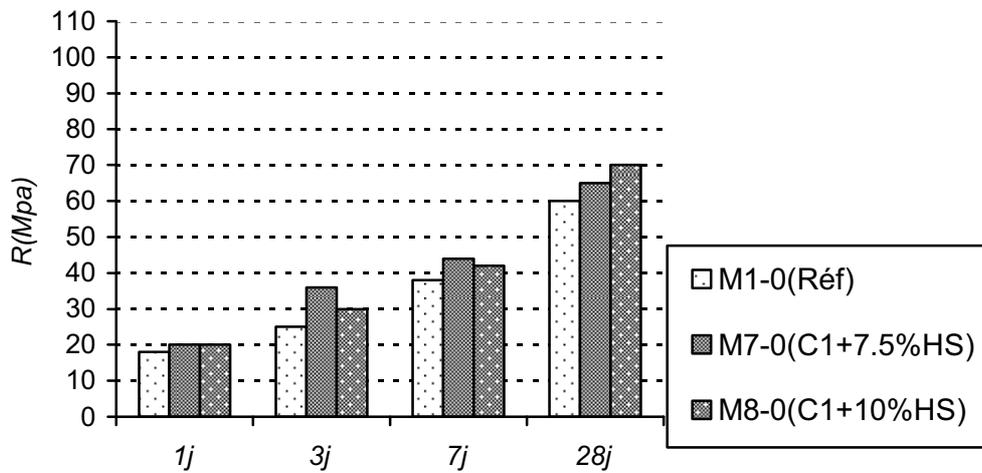


Figure 3.6 : Effet de l'homogénéisation sable- ciment C1 sur l'évolution des résistances

L'homogénéisation du sable siliceux et du ciment C1 par broyage-malaxage au taux de 7.5% de sable prolonge de façon significative le temps de début de prise (environ 50%) et le temps de fin de prise (25%). Par contre pour la teneur de 10%, les temps de prise sont comparables à ceux du mélange de référence.

Les résistances mécaniques des mélanges homogénéisés sont supérieures, en moyenne de 10 à 15% à toutes les échéances à celles du mélange de référence.

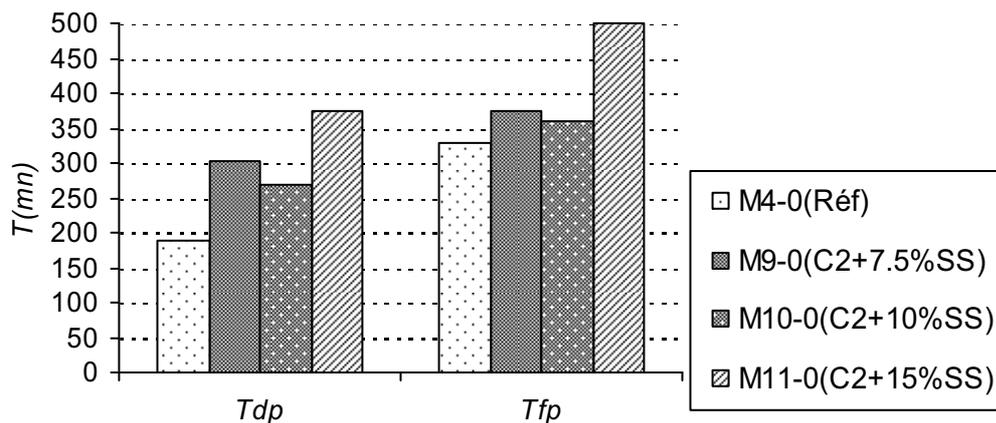


Figure 3.7: Effet de l'homogénéisation sable- ciment C2 sur le temps de prise

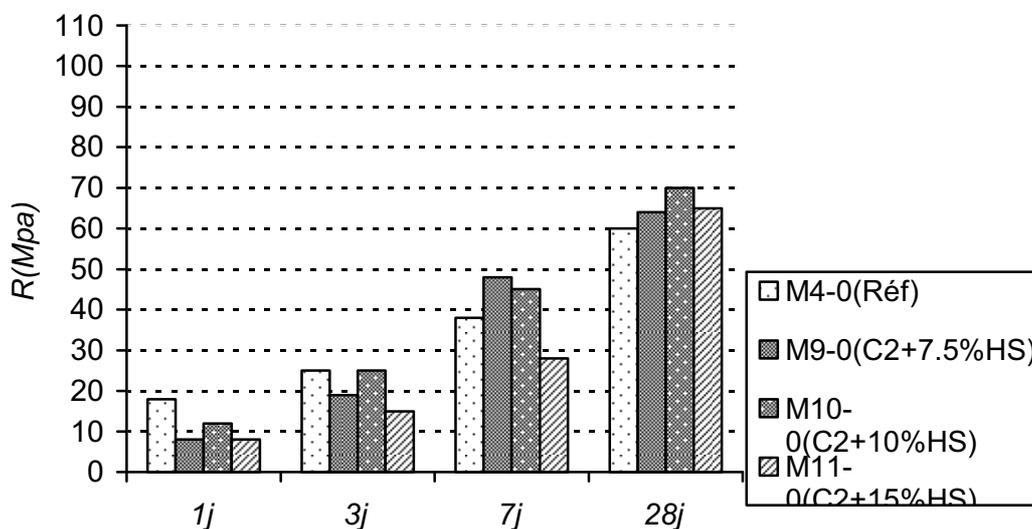


Figure 3.8 : Effet de l'homogénéisation sable- ciment C2 sur l'évolution des résistances mécaniques

En ce qui concerne le ciment C2, ce mode d'addition (**HS**) conduit à une augmentation très sensible du temps de début de prise notamment pour la teneur la plus élevée où le temps est quasiment doublé ; l'effet se prolonge sur le temps de fin de prise mais de façon moins importante.

Les résistances mécaniques des mélanges homogénéisés aux jeunes âges (1 jour et 3 jours) sont plus faibles que celles du mélange de référence mais rejoignent et dépassent même celles du mélange de base à plus long terme (7 jours et 28 jours).

3.3 EFFET DU SABLE SILICEUX BROYE UTILISE COMME ADDITION SUBSTITUE AU CIMENT SUR LE TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANIQUES (SS)

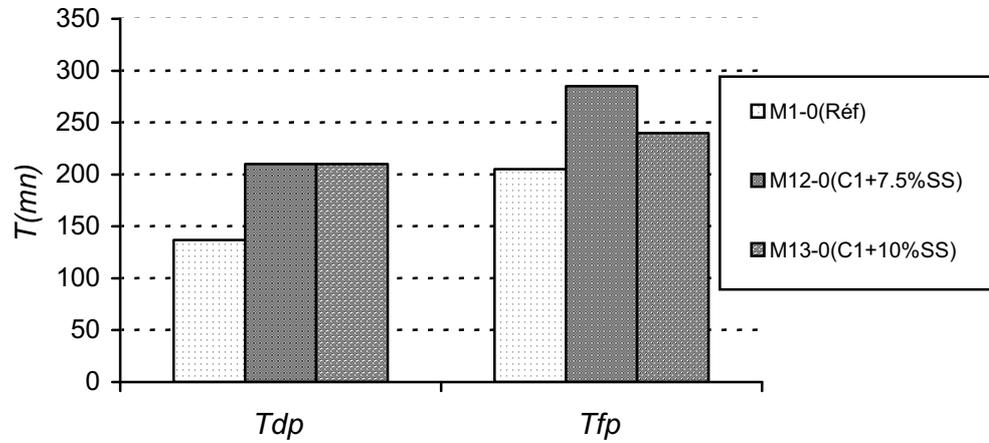


Figure 3.9 : Effet du sable siliceux comme addition sur le temps de prise du ciment C1

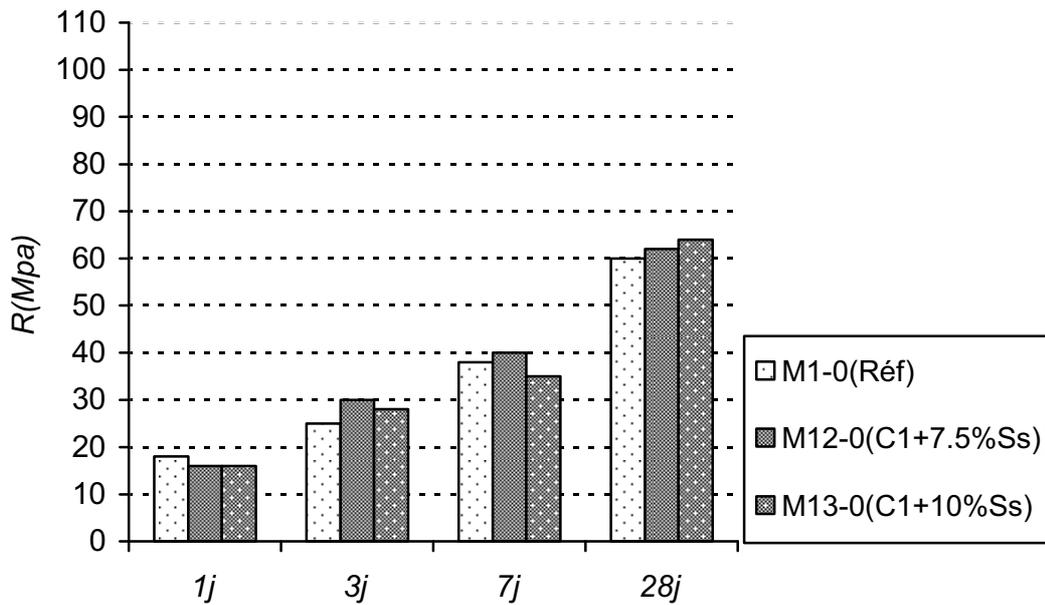


Figure 3.10: Effet du sable siliceux comme addition sur l'évolution des résistances du ciment C1

Pour le ciment C1, l'ajout de sable siliceux conduit à un retard du temps de début de prise d'un niveau comparable à celui du paragraphe précédent pour pratiquement toutes les teneurs en sable broyé substitué au ciment C1.

Pour les résistances mécaniques, on observe sur la figure 3.10 une diminution faible de l'ordre de 10% à très court terme (1 jour). Par contre à plus long terme, les mélanges avec sable siliceux donnent des résistances légèrement supérieures à celles du mélange de référence.

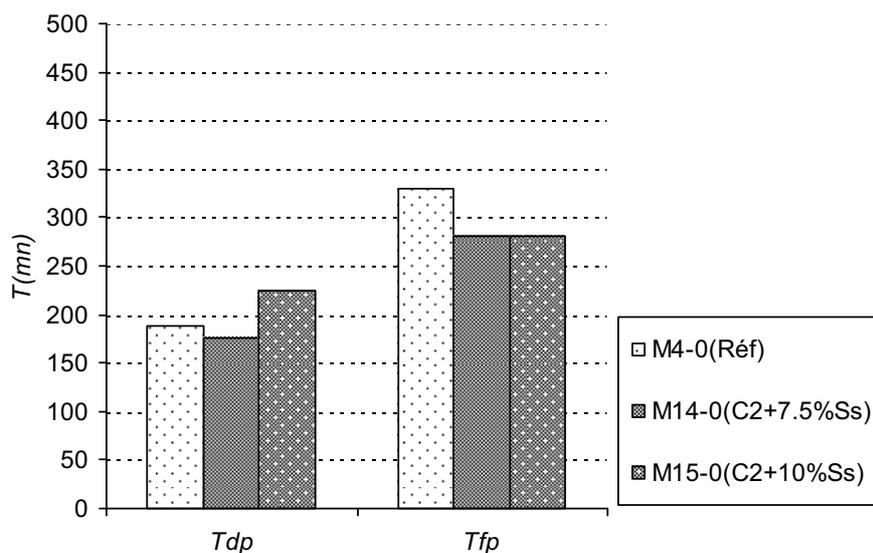


Figure 3.11 : Effet du sable siliceux sur le temps de prise du ciment C2

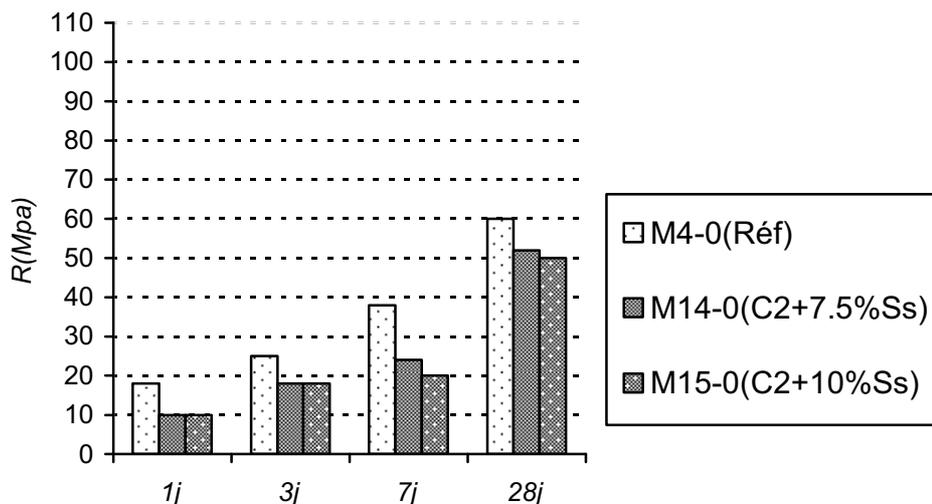


Figure 3.12 : Effet du sable siliceux comme addition sur l'évolution des résistances du ciment C2

Pour ce qui est du ciment C2, le temps de début de prise sont du même ordre de grandeur que le mélange de base, tandis que les temps de fin de prise sont réduits de l'ordre de 15% par rapport à la référence.

Par contre à toutes les échéances, les résistances mécaniques des mélanges substitués sont largement inférieurs à ceux du mélange de base. Toutefois la différence tend à se réduire lorsque les durées d'hydratation s'allongent. Cette différence de l'ordre de 50% à 1 jour reste inférieure à 15% à 28 jours.

3.4 COMPARAISON DES EFFETS DES DIFFERENTES ADDITIONS SUR LE TEMPS DE PRISE ET LES RESISTANCES MECANIQUES DES CIMENTS C1 ET C2

3.4.1 CIMENT C1

3.4.1.1 Temps de prise

a) Taux de 7.5%

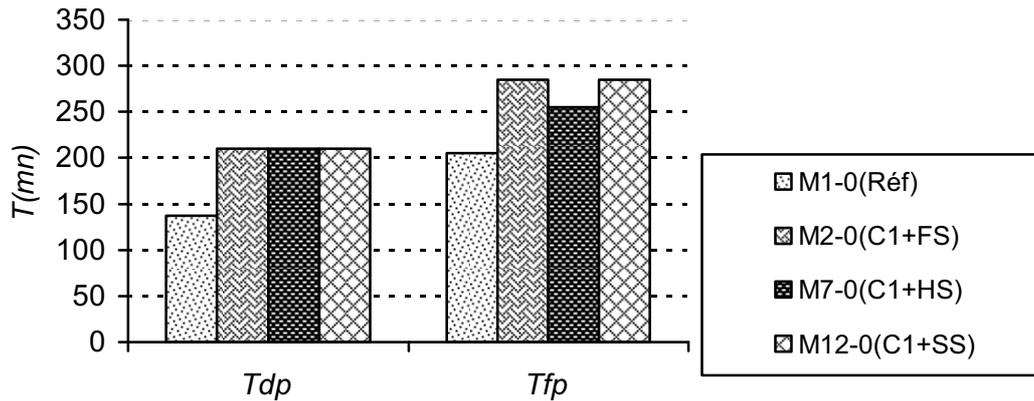


Figure 3.13: Comparaison des effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C1 (taux de 7.5%)

Dans ce cas le temps de début de prise est retardé au même niveau, soit environ 50%, pour tous les mélanges par rapport au mélange de base. Ce constat est également vrai en ce qui concerne le temps de fin de prise mais le retard est atténué dans le cas du mélange HS.

b) Taux de 10%

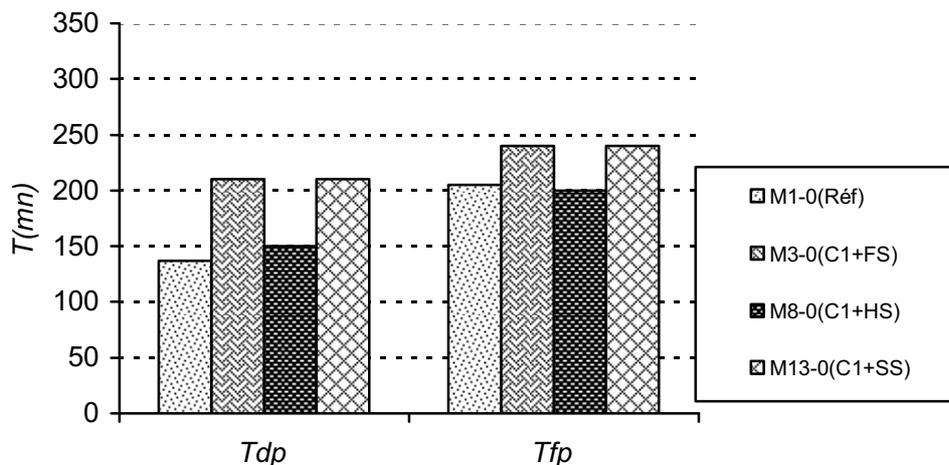


Figure 3.14: Comparaison des effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C1 avec le taux de 10%

Chapitre3

Pour le temps de début de prise, la figure 3.14 montre un retard d'environ 50% pour les mélanges FS et SS par rapport au mélange de base. Ce retard n'est que d'environ 10% pour le mélange HS par rapport au mélange de base.

Pour le temps de fin de prise, le phénomène est plus atténué et le retard n'est que de 10% pour les mélanges FS et SS par rapport au mélange de base. En revanche, une légère amélioration du temps de fin de prise est à noter pour le mélange HS par rapport au mélange de base.

Au final la comparaison entre les effets des différentes additions permet de mettre en évidence les éléments suivants :

Pour le ciment C1 le temps de prise pour les différentes additions sont pratiquement équivalents et supérieurs au mélange de référence pour la teneur de 7.5% (Fig.3.13). Par contre pour la teneur de 10% l'influence est moins marquée notamment dans le cas du mélange homogénéisé (HS).

3.4.1.2 Résistance mécanique

a) Taux de 7.5%

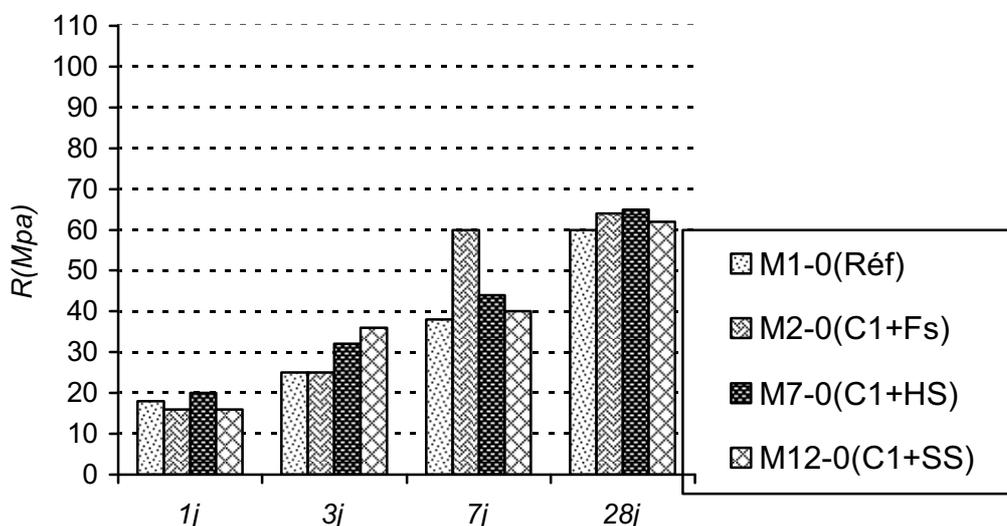


Figure 3.15: Comparaison des effets des différentes additions sur l'évolution des résistances mécaniques du ciment C1

A très court terme la résistance à la compression chute de 11% avec l'addition de 7.5% de fumée de silice, et de sable siliceux substitué au ciment. Par contre on remarque un effet inverse c'est-à-dire une augmentation de la résistance lorsque on ajoute 7.5% de sable siliceux rebroyé avec le ciment à une finesse au moins égale à celle du ciment C1.

A 3 jours d'échéance toutes les additions minérales augmentent la résistance en compression.

A 7 jours on remarque une augmentation importante de la résistance provoquée par l'addition de la fumée de silice (58%) (FS) puis le sable siliceux rebroyé avec le ciment (HS) avec une proportion de 16% et en fin le sable broyé substitué au ciment (SS) avec un ratio de 5%.

A 28 jours la fumée de silice (FS) et le sable siliceux rebroyé avec le ciment (HS) ont un effet semblable provoquant ainsi une augmentation de la résistance de 7 à 8% par contre le sable siliceux broyé substitué au ciment (SS) à un effet modéré sur la résistance avec une augmentation de 3%.

Globalement on peut considérer que quelle que soit la nature de la substitution, on observe une amélioration de la résistance mécanique au-delà du très court terme.

b) Taux de 10%

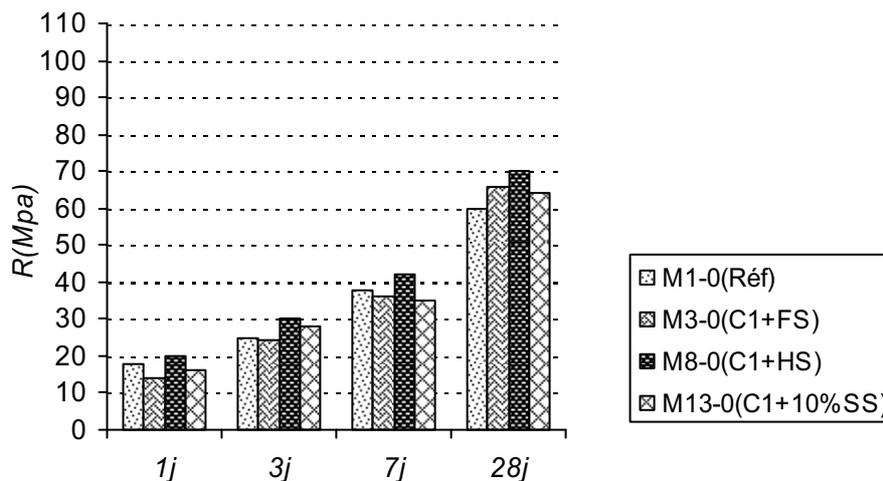


Figure 3.16: Comparaison des effets des différentes additions sur l'évolution des résistances du ciment C1 avec le taux de 10%

Pour les résistances en compression les mélanges substitués ont des résistances supérieures au mélange de base quelle que soit la nature de la substitution. Lorsque la teneur en ajout s'élève à 10%, les résistances sont approximativement équivalentes. Toutefois le mélange homogénéisé sable-ciment (HS) a toujours des résistances supérieures au mélange témoin de l'ordre de 10% quelle que soit l'échéance (Fig. 3.16).

3.4.2 Ciment C2

3.4.2.1 Temps de prise

a) Taux de 7.5%

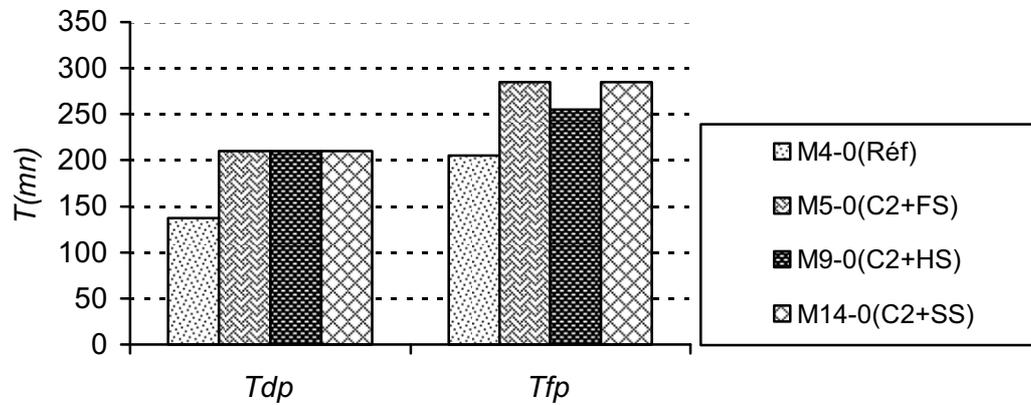


Figure 3.17: Comparaison des effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C2 avec le taux de 7.5%

b) Taux de 10%

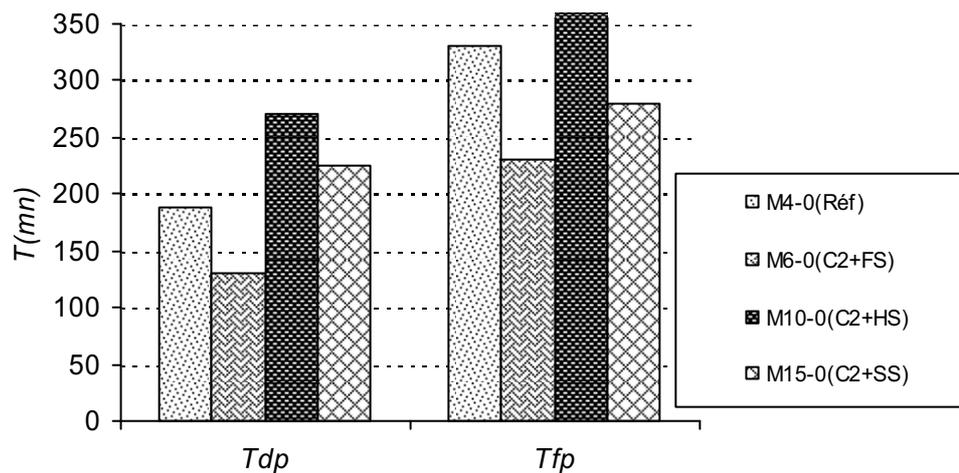


Figure 3.18 : Comparaison des effets des différentes additions sur le temps de prise du ciment C2 avec le taux de 10%

En ce qui concerne le ciment C2, les temps de début et fin de prise sont approximativement équivalents pour les mélanges substitués avec le sable siliceux et supérieurs au mélange de référence et ceux comportant de la fumée de silice.

3.4.2.2 Résistances mécaniques

a) Taux de 7.5%

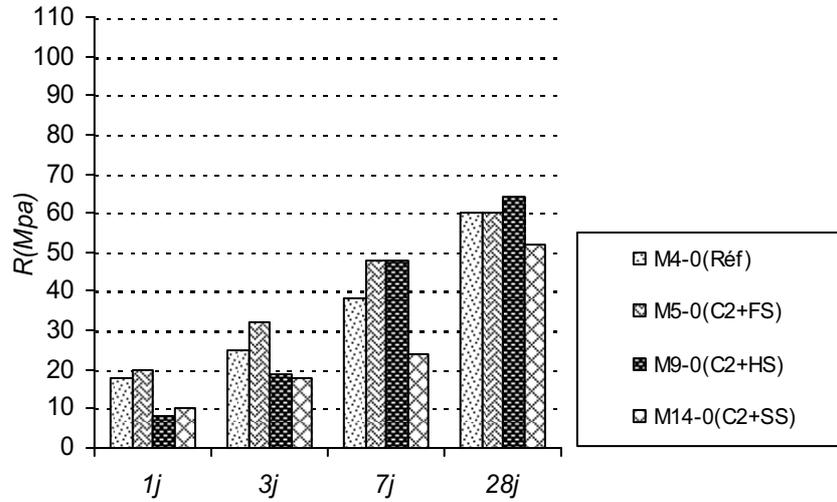


Figure 3.19 : Comparaison des effets des différentes additions sur l'évolution de la résistance du ciment C2 avec le taux de 7.5%

b) Taux de 10%

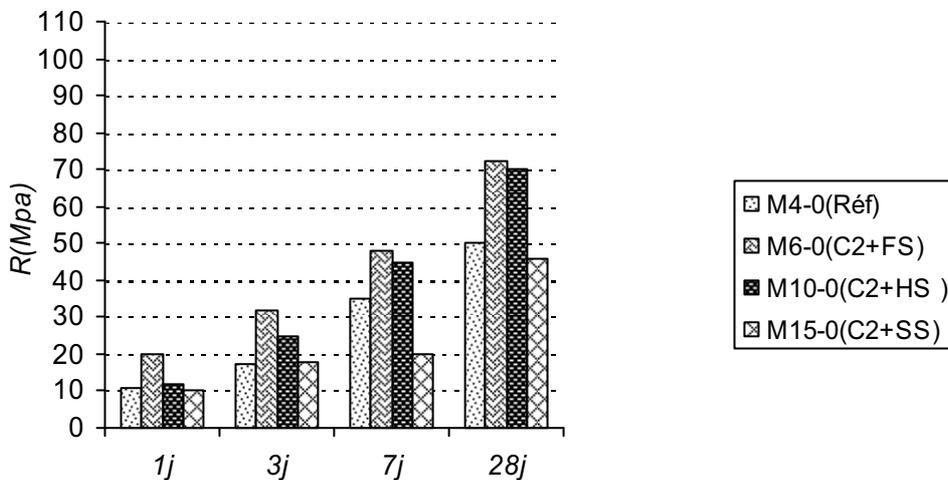


Figure 3.20: Comparaison des différentes additions sur l'évolution des résistances du ciment C2 avec le taux de 10%

Pour les courtes échéances (1 j et 3 j, les mélanges avec sable siliceux à des teneurs de 7.5%), donnent des résistances plus faibles que les mélanges de références. Par contre pour toutes les autres teneurs et quelle que soient les échéances, les mélanges substitués donnent

Chapitre3

des résistances en compression du même ordre que celle du mélange de référence. A nouveau le mélange homogénéisé sable-ciment (**HS**) donne les meilleures résistances à moyen terme (comparables à celles obtenues avec la fumée de silice).

3.5 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre consiste à analyser la contribution liante des additions siliceuses, relativement, aux performances physiques et mécaniques des pâtes.

Cet objectif a été fixé à la suite d'une analyse des études récentes et des textes normatifs qui a permis de montrer que les additions siliceuses peuvent modifier et même améliorer les propriétés des matériaux cimentaires.

Ainsi, nous avons été amenés à faire une comparaison du comportement des pâtes pures avec ou sans additions siliceuses. Nous avons procédé par une substitution en poids du ciment tout en maintenant le rapport eau sur liant ($E / C+A$) égale à 0.30.

Seize formulations de pâtes ont été confectionnées combinant des teneurs variables de sable siliceux et de fumée de silice avec deux types de ciment C1 et C2.

Les résultats ont montré que globalement l'introduction de l'addition minérale siliceuse joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il apparaît notamment que l'introduction de sable siliceux avec le mode opératoire de broyage-malaxage donne des résistances mécaniques supérieures à celles des mélanges de référence allant jusqu'à 30% pour le ciment C2 et du même ordre de grandeur que l'introduction de fumée de silice. L'addition minérale sous forme de SiO_2 conduit à la formation d'un supplément de CSH apportant ainsi une contribution supplémentaire à la résistance des mélanges substitués.

CHAPITRE 4 INFLUENCE DU NITRATE DE CALCIUM COMME ACCELERATEUR DE PRISE SUR LES PATES DE CIMENTS

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'influence du nitrate de calcium en tant qu'adjuvant non chloré sur le temps de début et fin de prise ainsi que sur l'évolution des résistances mécaniques en compression particulièrement celles à court terme des deux ciments de base C1 et C2 et des autres mélanges auxquels on a additionné le sable siliceux broyé et la fumée de silice.

Cette étude constitue une étape importante pour la suite de notre travail dans la mesure où nous souhaitons conserver constant le dosage en nitrate de calcium et évaluer le processus d'hydratation en fonction du type de ciment et de sa composition minéralogique à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Dans tous les mélanges le nitrate de calcium est introduit sous une teneur de 1% en poids de liant.

4.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1

4.1.1 TEMPS DE PRISE

a- Pâte pure à base de C1

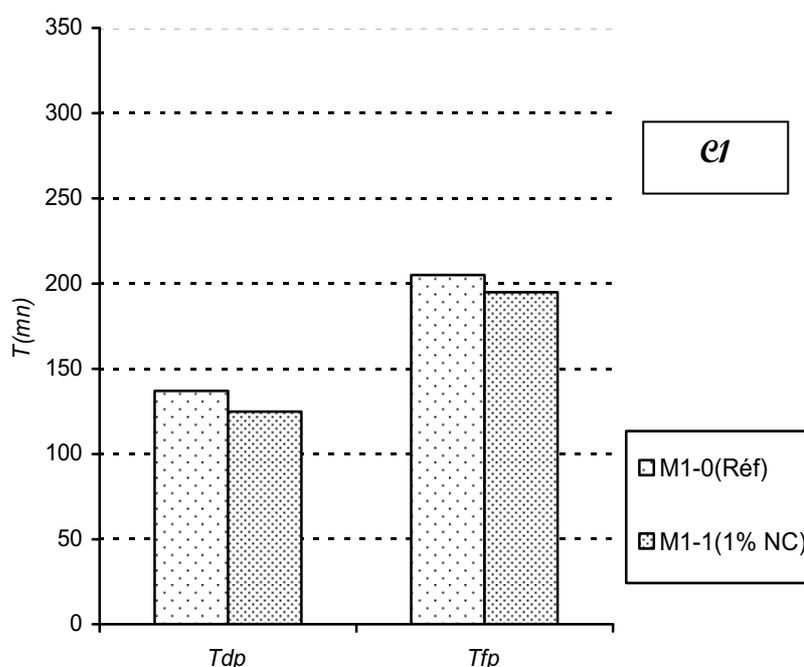


Figure 4.1 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M1-1

L'introduction du nitrate de calcium réduit légèrement le temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 10% et 5% pour le ciment de base C1 (mélange M1-1).

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

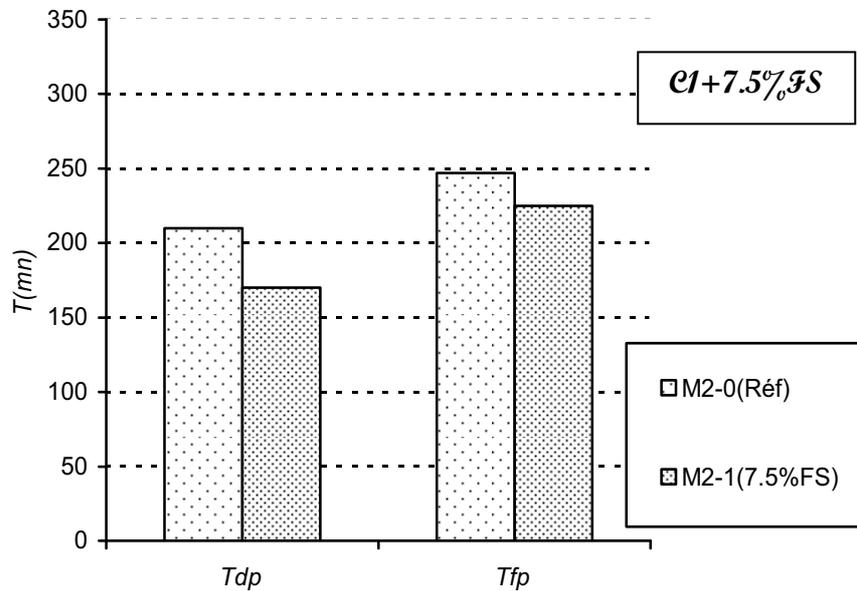


Figure 4.2 : Effet de NC sur le temps de prise -Mélange M2-1

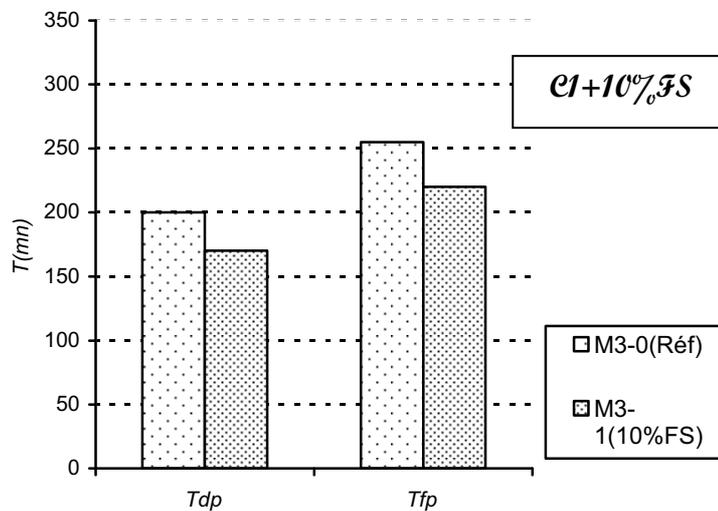


Figure 4.3 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M3-1

Les temps de début et de fin de prise sont davantage réduits en présence de NC, lorsqu'on substitue de la fumée de silice à une partie du ciment. Cette diminution est respectivement d'environ 20% et 10% lorsque le taux de substitution est de 7,5 % en FS (figure 4.2). La diminution des temps de début et fin de prise est globalement de 10% lorsque le taux de substitution en FS passe à 10% en poids du liant (figure 4.3).

c- Mélanges C1-HS

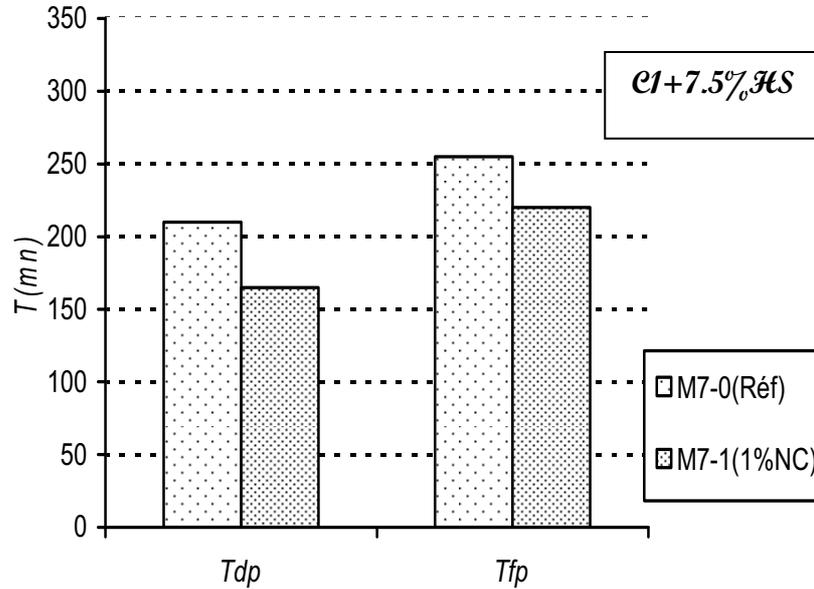


Figure 4.4 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M7-1 (HS)

Dans les mélanges M7 nous avons substitué 7.5% de sable HS au ciment C1. La figure 4.4 montre que l'introduction de 1% NC dans ces mélanges (M7-1) réduit le temps de début de prise d'environ 20 % par rapport au mélange de référence (M7-0) et le temps de fin de prise d'environ 15%.

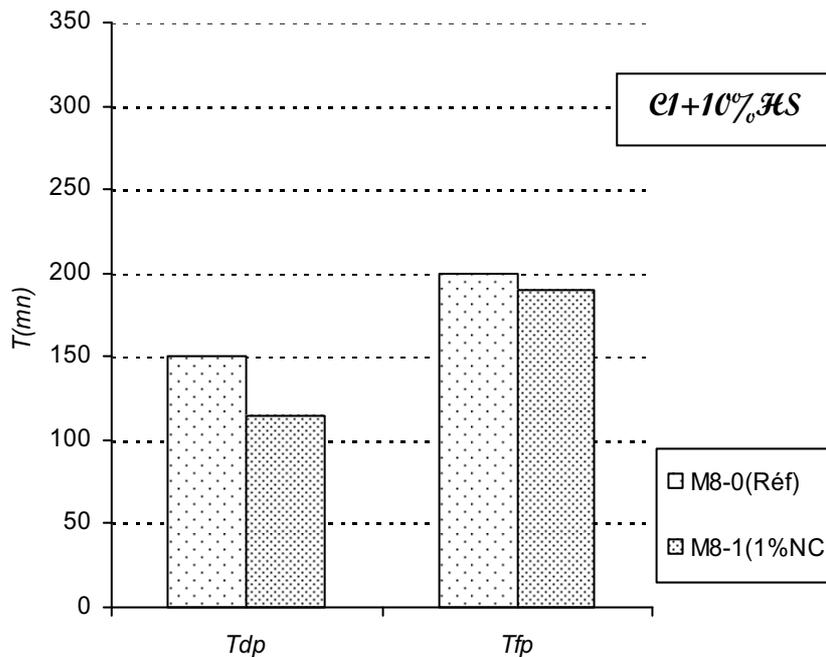


Figure 4.5 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M8-1

Chapitre 4

Dans les mélanges M8 le taux de substitution du sable HS est de 10%. Dans ce cas la réduction du temps de début de prise en présence de NC est du même ordre que le cas précédent (M7-1). Par contre la réduction du temps de fin de prise est moins importante et de l'ordre de 5% par rapport au mélange de référence sans NC (M8-0).

d- Mélange C1-SS

Dans les mélanges M12 et M13, nous avons substitué respectivement 7.5% et 10% de sable SS au ciment C1.

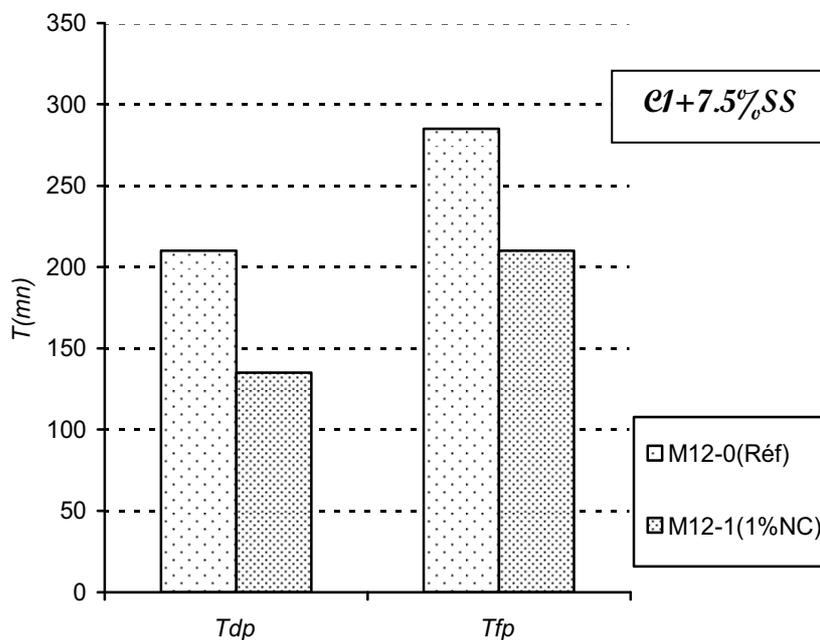


Figure 4-6 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M12-1

La figure 4.6 montre que l'ajout d'une quantité de 1% de nitrate de calcium par rapport au poids du mélange M12-1 fait réduire respectivement le temps de début et fin de prise d'environ 35% et 25% comparativement au mélange de référence.

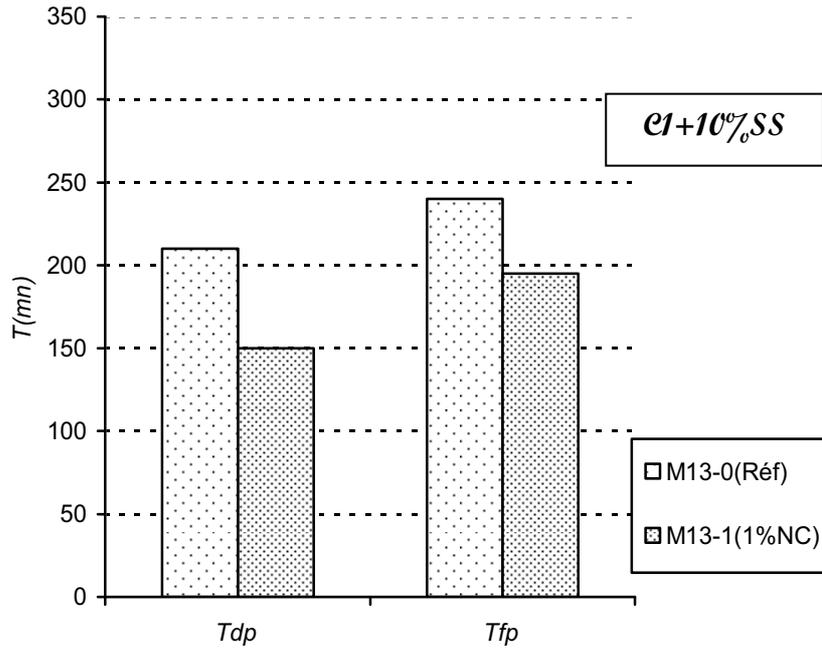


Figure 4.7 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M13-1

Pour les mélanges M13 à 10% de sable SS, l'introduction de NC conduit à une réduction des temps de début de prise et de fin de prise légèrement moins importante que celle des mélanges précédents (M12) soit respectivement à peu près 30% et 20% (figure 4.7).

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1* (M1) (100%C1)	C1-1* (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2* (M3) (C1-10%FS)	C1-3* (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4* (M8) (C1-10%HS)	C1-5* (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6* (M13) (C1-10%SS)
TDP (min)	Réf	137	210	200	210	150	210	210
	1%NC	125	170	170	165	115	135	150
	% / Réf	91	81	85	79	77	64	71
TFP (min)	Réf	205	247	255	255	200	285	240
	1%NC	195	225	220	220	190	210	195
	% / Réf	95	91	86	86	95	74	81

* voir la définition des mélanges §chap.II

Tableau 4.1 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC

On constate que le nitrate de calcium est plus efficace avec le mélange de ciment C1 et 7.5% de sable siliceux broyé substitué (M12-1) pour lequel il réduit le temps de début de prise de 35% et le temps de fin de prise de 25%.

D'après les résultats précédents nous remarquons que le nitrate de calcium réagit mieux avec les mélanges contenant des additions minérales à base de ciment C1.

4.1.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C1

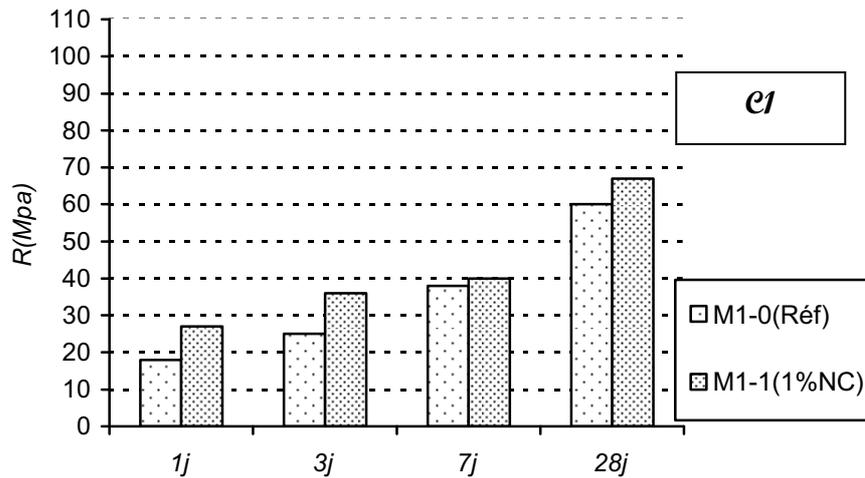


Figure 4.8 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M1-1

La figure 4.8 montre que pour la pâte pure à base du ciment C1, l'introduction du nitrate de calcium fait augmenter la résistance mécanique à la compression simple d'environ 50% à 1j, de 45% à 3j, 5% à 7j et de 10% à 28j. L'efficacité du nitrate de calcium vis-à-vis des résistances mécaniques est importante au jeune âge (entre 1 et 3 jours).

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

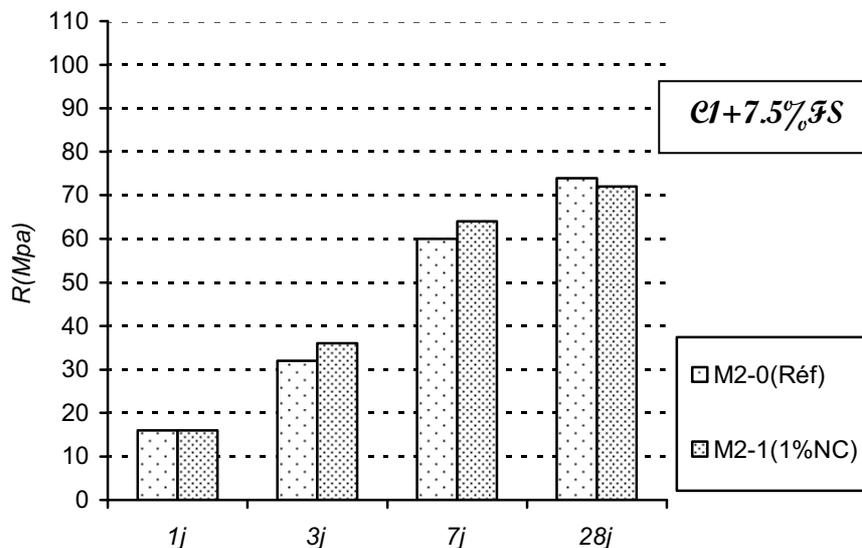


Figure 4.9 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques -Mélange M2-1

Le nitrate de calcium conduit à l'augmentation de la résistance mécanique du mélange M2 (C1 et 7.5% FS) d'environ 10% entre 3 et 7 jours. Par contre il n'a pas d'effet ni sur la résistance mécanique à court terme ni sur celle à long terme si ce n'est une petite diminution de résistance de 5% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues sur le mélange de référence (figure 4.9).

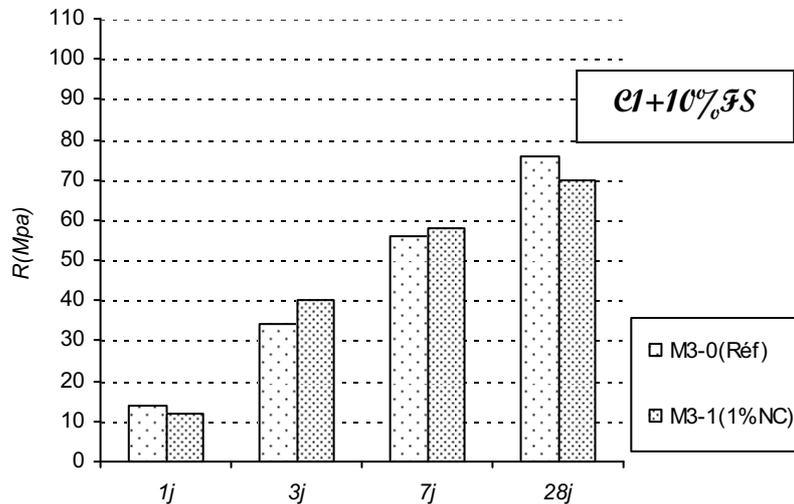


Figure 4.10 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M3-1

L'introduction de NC dans les mélanges M3 à 10% de FS produit les mêmes effets sur les résistances mécaniques à 3 et 7 jours que ceux produits sur les mélanges M2. Par contre les résistances à 1j et 28j sont légèrement diminuées.

c- Mélanges C1- sable HS

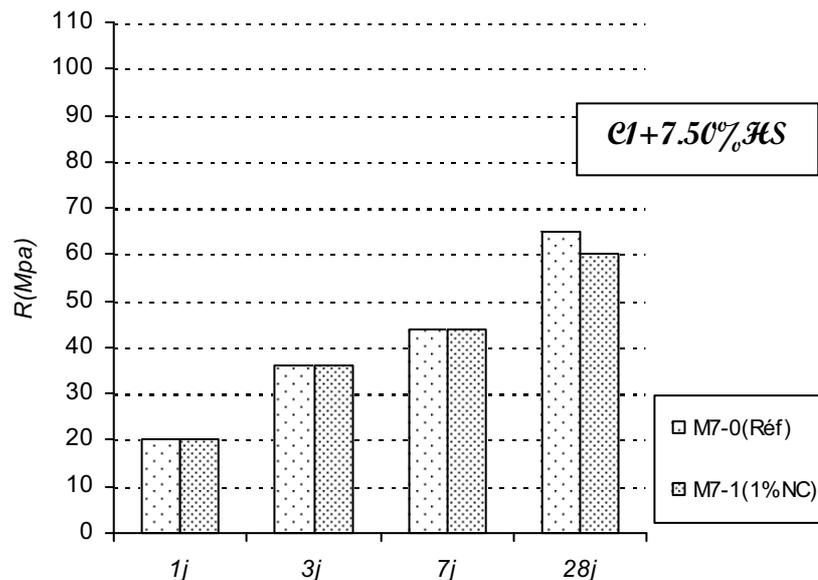


Figure 4.11 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques- Mélange M7-1

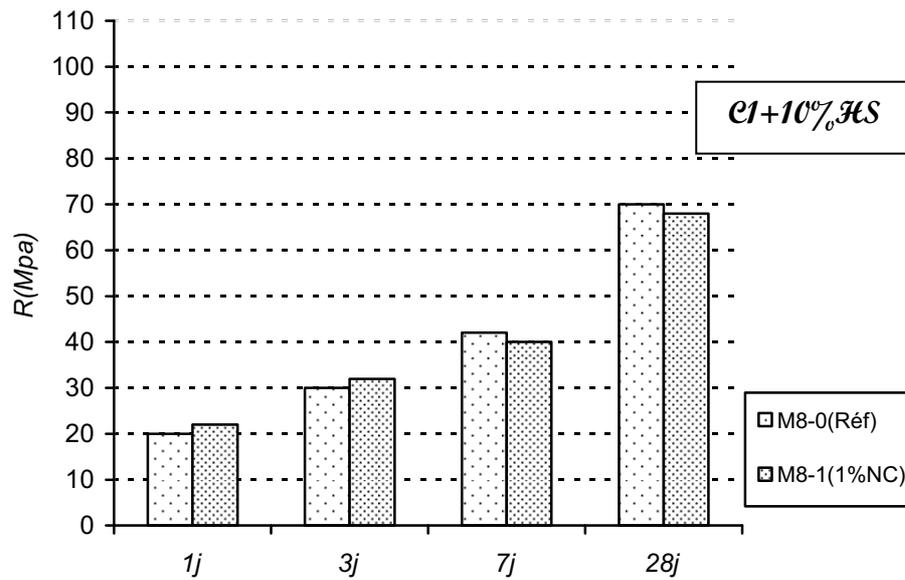


Figure 4.12 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M8-1

Les figures 4.11 et 4.12 montrent que pour les mélanges C1-HS, l'introduction de NC n'a globalement que peu d'effet sur les résistances mécaniques.

d- Mélanges C1- sable SS

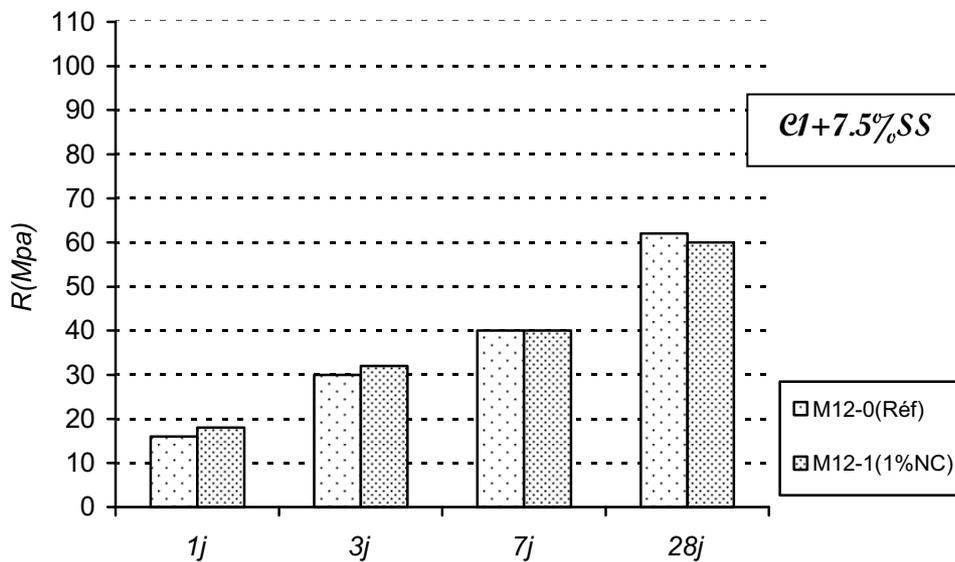


Figure 4.13 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M12-1

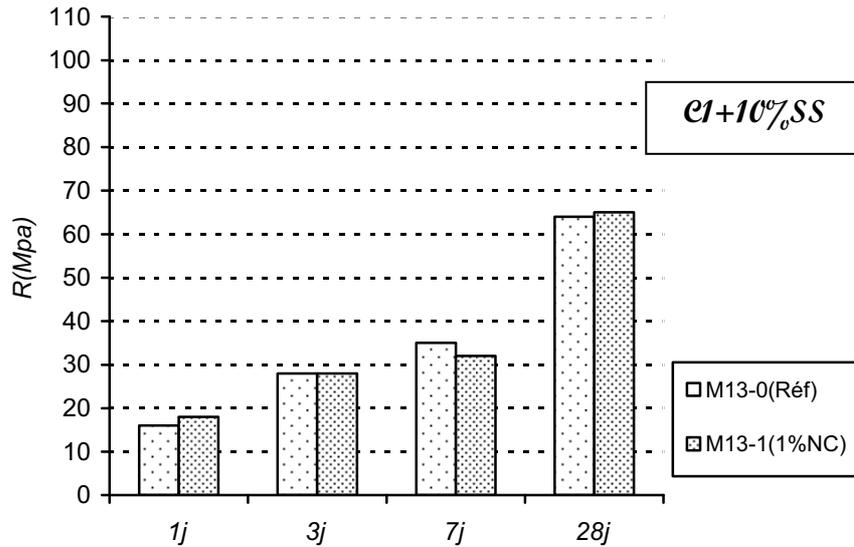


Figure 4.14 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques – Mélange M13-1

Les figures 4.13 et 4.14 montrent que, pour les mélanges avec du sable SS, l'introduction de NC conduit aux mêmes phénomènes que ceux observés sur les mélanges avec HS.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1* (M1) (100%C1)	C1-1* (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2* (M3) (C1-10%FS)	C1-3* (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4* (M8) (C1-10%HS)	C1-5* (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6* (M13) (C1-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	18	16	14	20	20	16	16
	1%NC	27	16	12	20	22	18	18
	% / Réf	1.50	1.00	0.86	1.00	1.10	1.13	1.13
R3j (Mpa)	Réf	25	32	34	36	30	30	28
	1%NC	36	36	40	36	32	32	28
	% / Réf	1.44	1.13	1.18	1.00	1.07	1.07	1.00
R7j (Mpa)	Réf	38	60	56	44	42	40	35
	1%NC	40	64	58	44	40	40	32
	% / Réf	1.05	1.07	1.04	1.00	0.95	1.00	0.91
R28j (Mpa)	Réf	60	74	76	65	70	62	64
	1%NC	67	72	70	60	68	60	65
	% / Réf	1.12	0.97	0.92	0.92	0.97	0.97	1.02

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 4.2: Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC

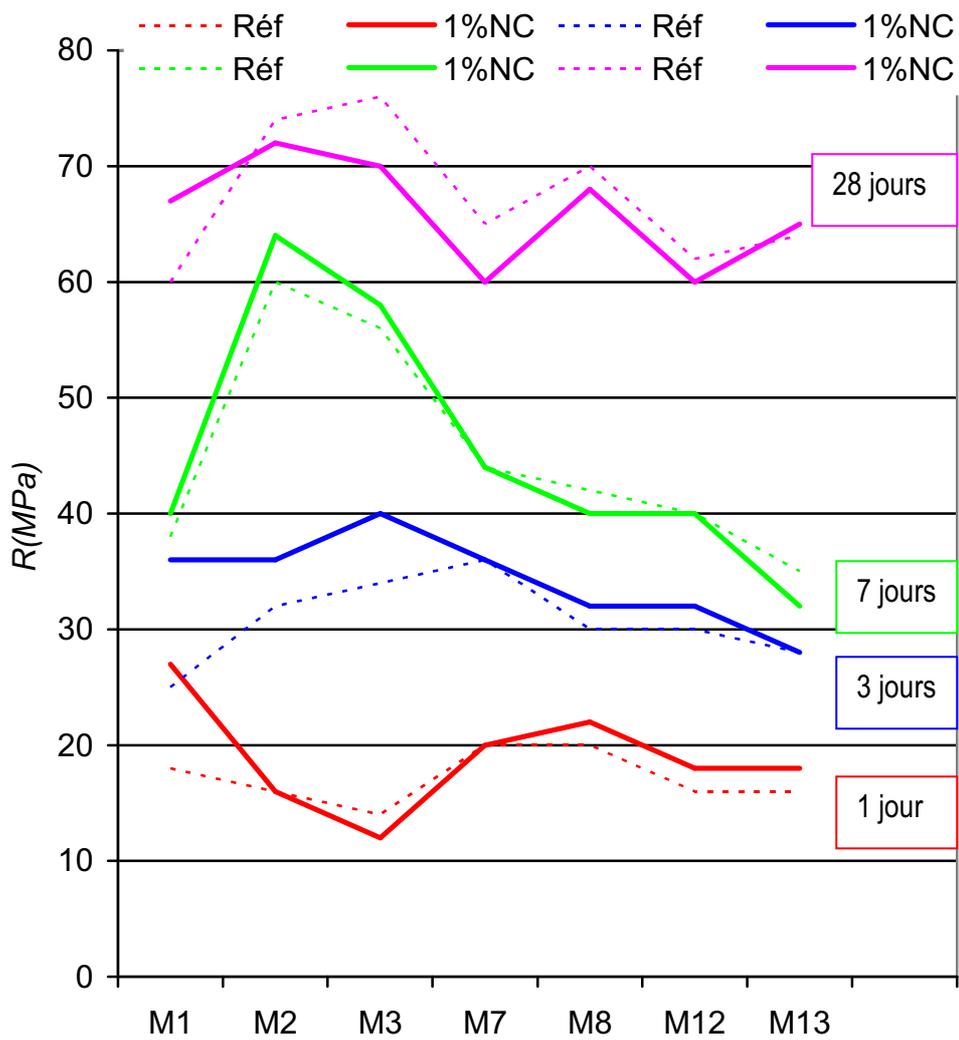


Figure 4.15: Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC

D'après le tableau 4.2 et la figure 4.15 on remarque que le NC améliore considérablement la résistance mécanique de la pâte pure (mélange M1) notamment à court terme (1 et 3 jour) mais n'a pas ou peu d'effet sur les résistances mécaniques des mélanges siliceux à toutes les échéances.

4.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2

4.2.1 TEMPS DE PRISE

a- pâte pure à base de C2

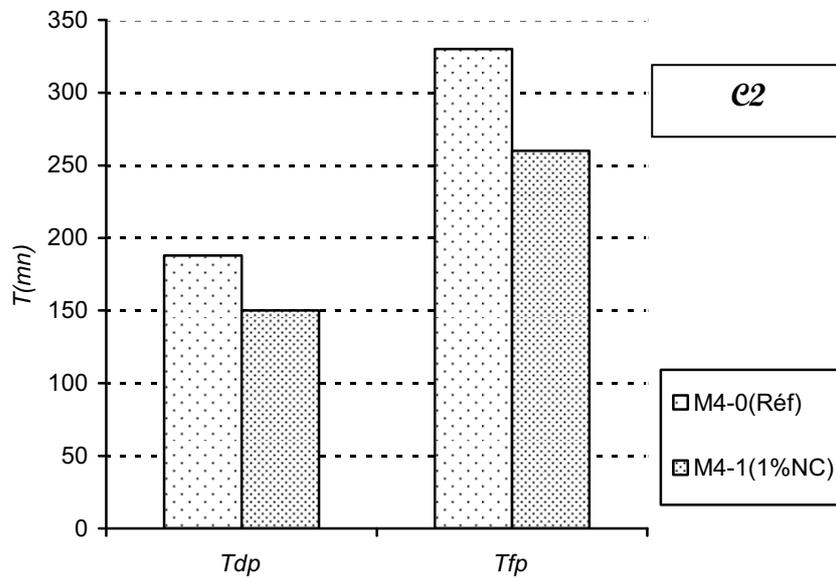


Figure 4.16 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M4-1

La figure 4.15 montre que l'introduction de NC fait réduire le temps de début et de fin de prise de la pâte pure à base du ciment C2 (mélange M4) d'environ 20%.

b- Mélanges C2- fumée de silice (FS)

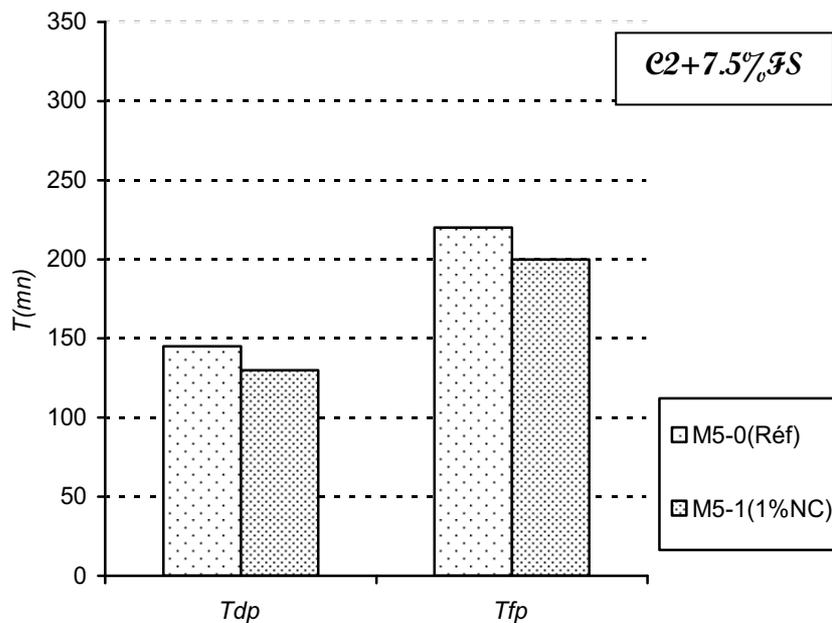


Figure 4.17: Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M5-1

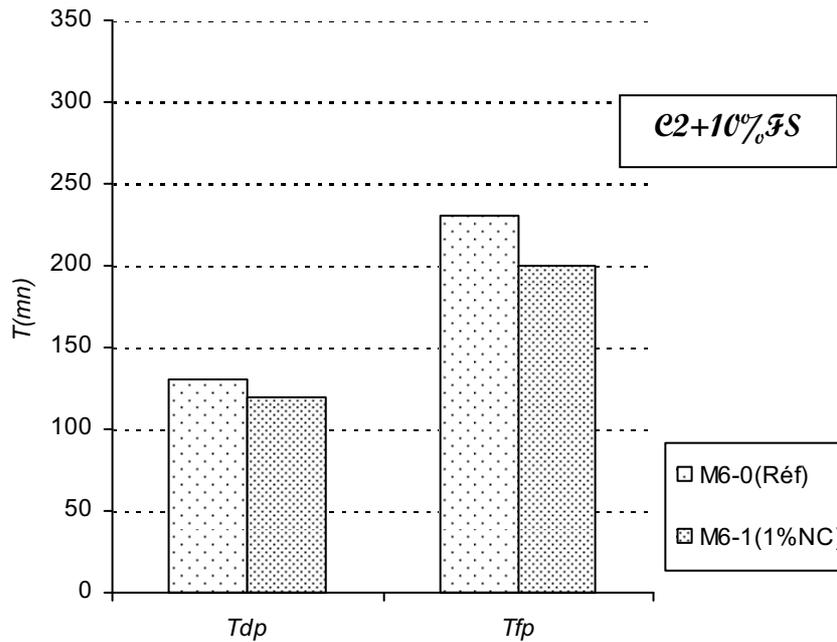


Figure 4.18 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M6-1

Dans le cas des mélanges avec fumée de silice, quel que soit le dosage de substitution, l'introduction de NC contribue à la réduction des temps de début et le temps de fin de prise d'environ 10% (figures 4.17 et 4.18).

c- Mélanges C2- sable HS

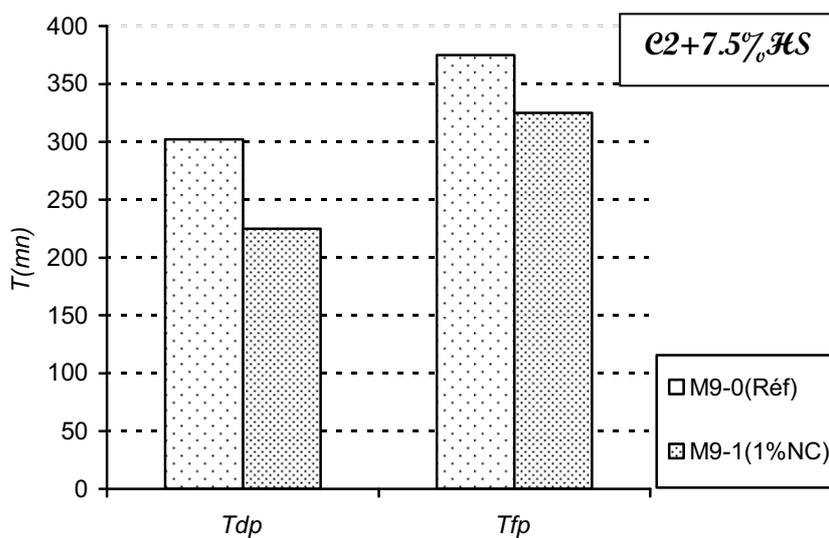


Figure 4.19 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M9-1

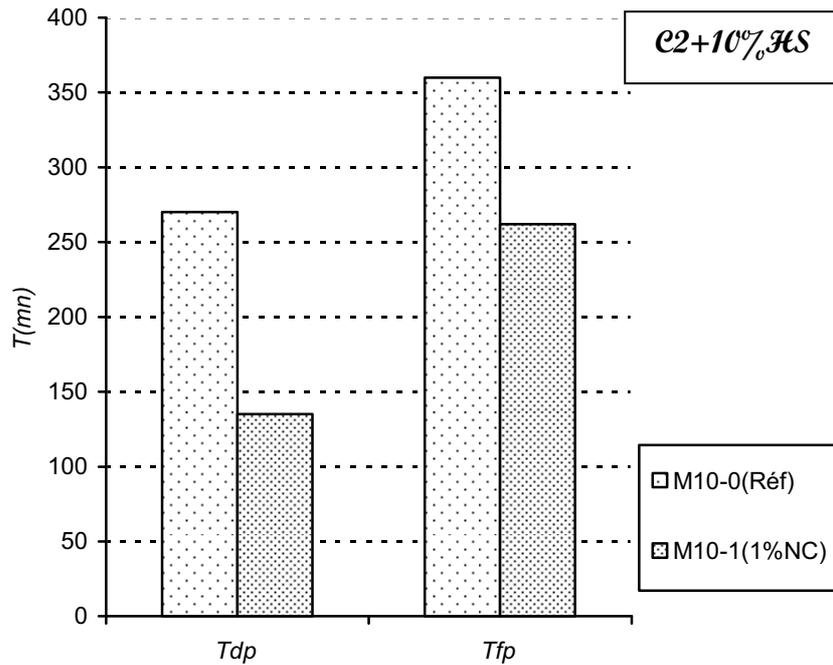


Figure 4.20 : Effet de NC sur le temps de prise -Mélange M10-1

Les figures 4.19 et 4.20 indiquent que l'ajout de NC conduit à une réduction considérable du temps de début et du temps de fin de prise des mélanges avec le sable HS. Cette réduction peut aller jusqu'à 50% pour le temps de début de prise dans le cas du mélange à 10% de sable HS (M10) (figure 4.20).

d- Mélanges C2- sable SS

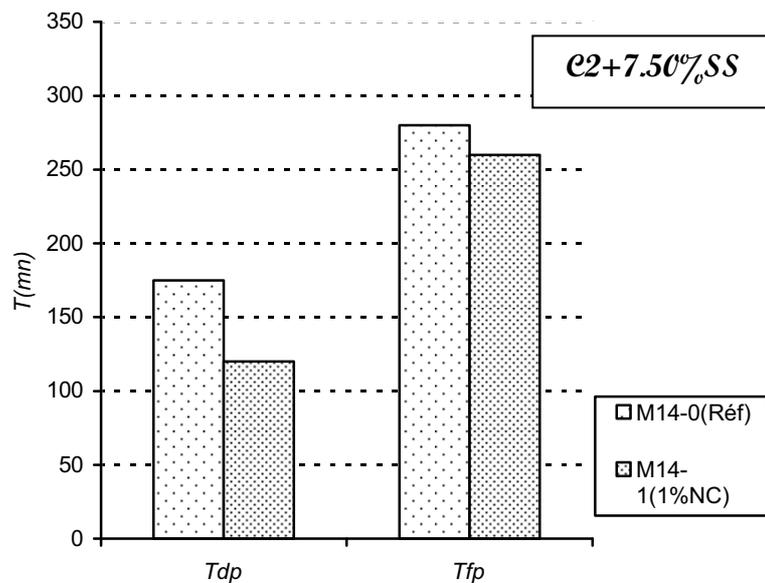


Figure 4.21: Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M14-1

Le dosage de 1% de nitrate de calcium par rapport au poids dans le mélange de ciment C2 avec 7.5%SS (M14-1) entraîne une réduction respective sur les temps de début et fin de prise d'environ 30% et 5% par comparaison à ceux du mélange de référence M14-0.

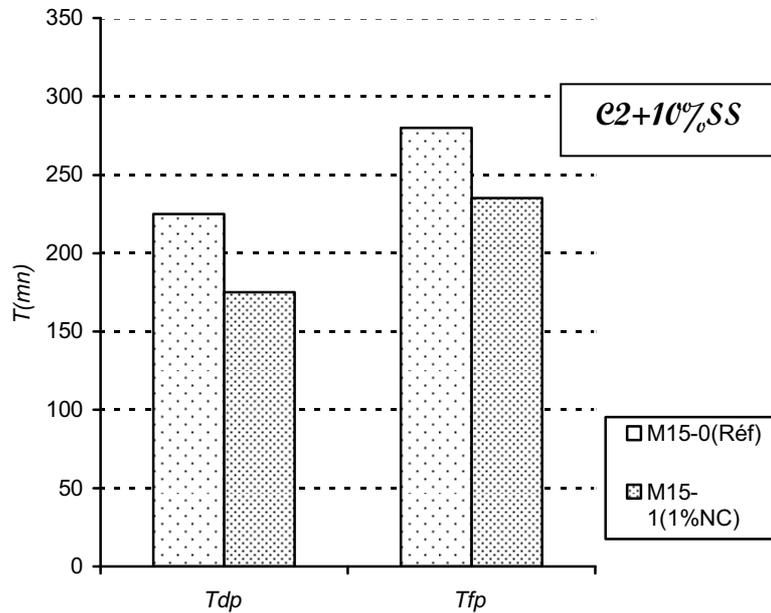


Figure 4.22 : Effet de NC sur le temps de prise - Mélange M15-1

L'addition d'une quantité de 1% de nitrate de calcium par rapport au poids du mélange constitué de ciment C2 et 10% de sable siliceux substitué SS (M15-1) provoque une diminution respective des temps de début et fin de prise d'environ 20% et 15% comparativement à ceux de M15-0.

Dans le cas des mélanges avec le sable SS (figure 4.21 et 4.22), le NC fait réduire le temps de début et le temps de fin de prise respectivement d'environ 30% et 5% pour les mélanges à 7.5 % de SS et de 20% et 15% pour ceux à 10% de SS.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2* (M4) (100%C2)	C2-1* (M5) (C2-7.5%FS)	C2-2* (M6) (C2-10%FS)	C2-3* (M9) (C2-7.5%HS)	C2-4* (M10) (C2-10%HS)	C2-5* (M14) (C2-7.5%SS)	C2-6* (M15) (C2-10%SS)
TDP (min)	Réf	188	145	130	302	270	175	225
	1%NC	150	130	120	225	135	120	175
	% / Réf	80	90	92	75	50	69	78
TFP (min)	Réf	330	220	230	375	360	280	280
	1%NC	260	200	200	325	262	260	235
	% / Réf	79	91	87	87	73	93	84

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 4.3 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de NC

Nous constatons, d'après les résultats obtenus et regroupés dans le tableau 4.3, que le NC joue un rôle très important pour la réduction des temps de prise des différents mélanges siliceux à base du ciment C2 notamment dans le cas du mélange M10 pour lequel 10% de sable HS a été substitué au ciment C2.

En comparant les temps de début et fin de prise des ciments de base C1 et C2 on constate que l'efficacité du nitrate de calcium est plus importante sur le ciment C2 à teneur faible en aluminates de calcium que sur le ciment C1.

4.2.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C2

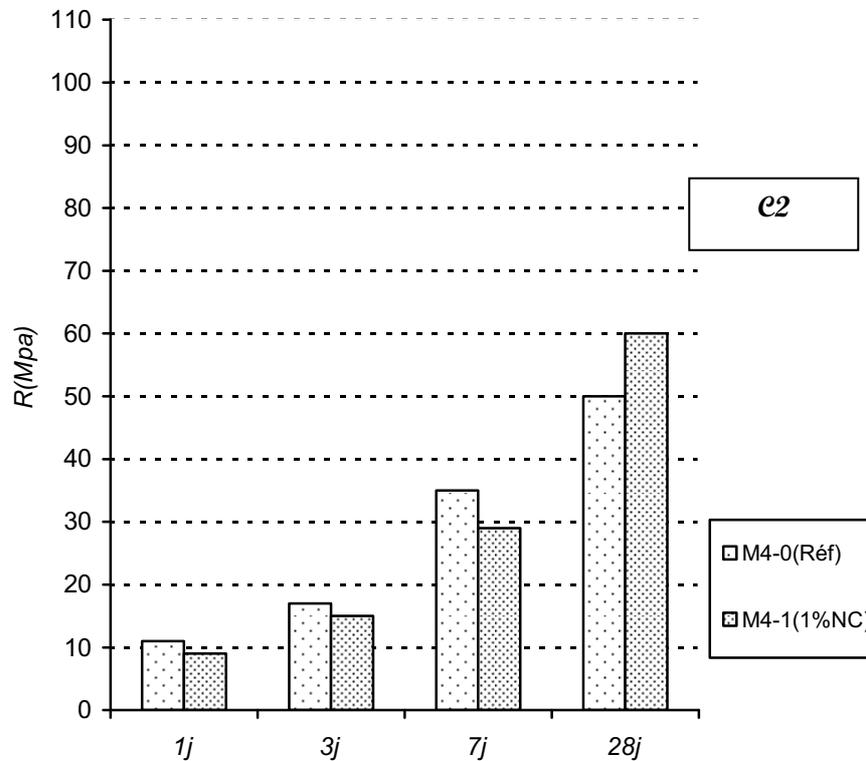


Figure 4.23 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M4-1

La figure 4.23 montre que l'introduction du NC dans un mélange de pâte pure à base de C2 (mélange 100% C2), provoque une baisse de la résistance mécanique à court terme. Celle ci baisse d'environ 20% à 1jour, 10% à 3jours et 15% à 7 jours. En revanche, NC conduit à une augmentation d'environ 20% de cette résistance mécanique à plus long terme (28 jours).

b – Mélanges C2 – fumée de silice (FS)

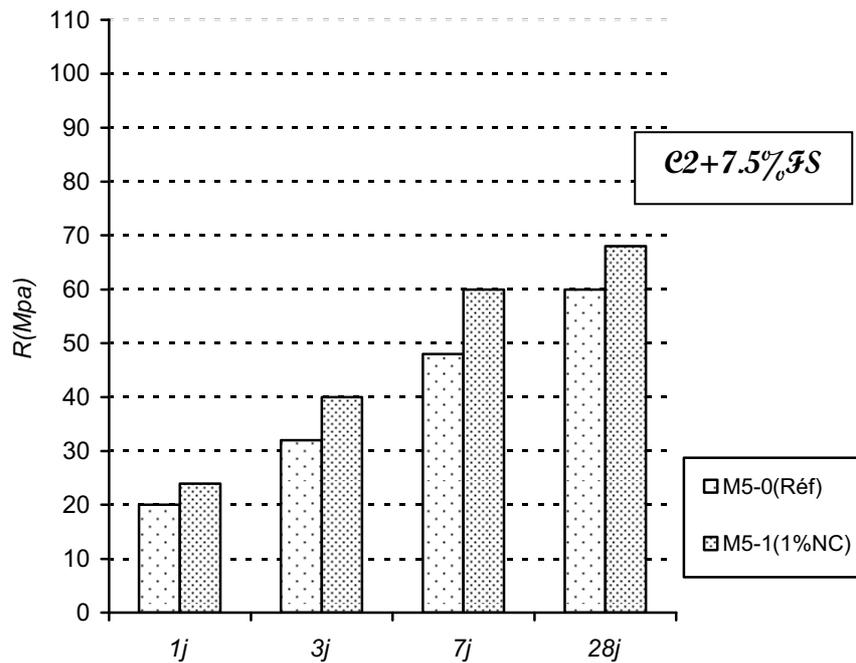


Figure 4.24 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M5-1

La figure 4.24 montre que l'introduction de NC dans un mélange dans lequel 7.5% de fumée de silice ont été substitués au ciment C2 (M5), fait augmenter la résistance mécanique d'environ 20% à 1jour, 25% à 3 et 7 jours et 10% à 28jours.

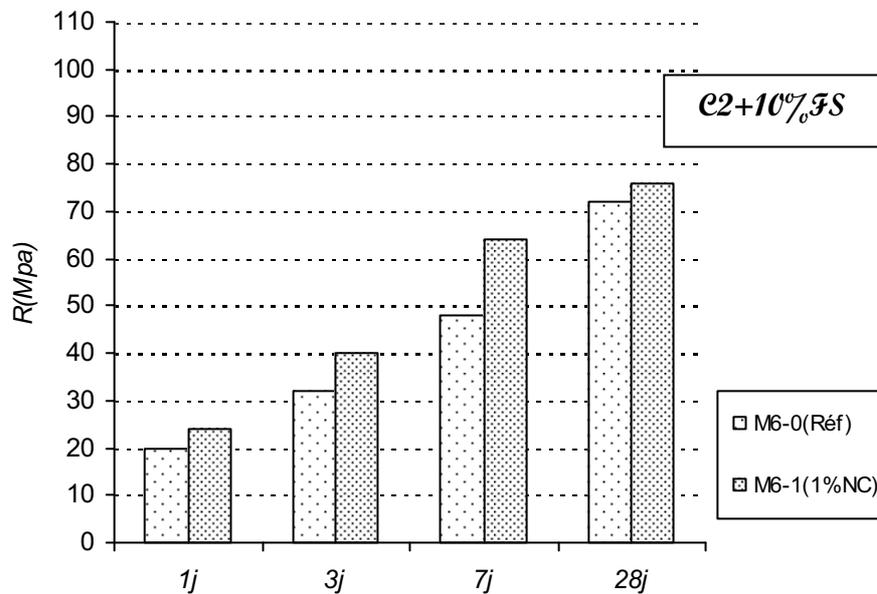


Figure 4.25 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M6-1

L'ajout de NC dans un mélange dans lequel 10% de fumée de silice a été substitué au ciment C2 (M6), fait augmenter la résistance mécanique d'environ 20% à 1jour, 25% à 3jours, 30% à 7jours et

5% à 28 jours (figure 4.25). Nous constatons donc que le phénomène est à peu près similaire à celui observé dans le cas précédent (mélanges avec 7.5% FS).

c - Mélanges C2 – sable HS

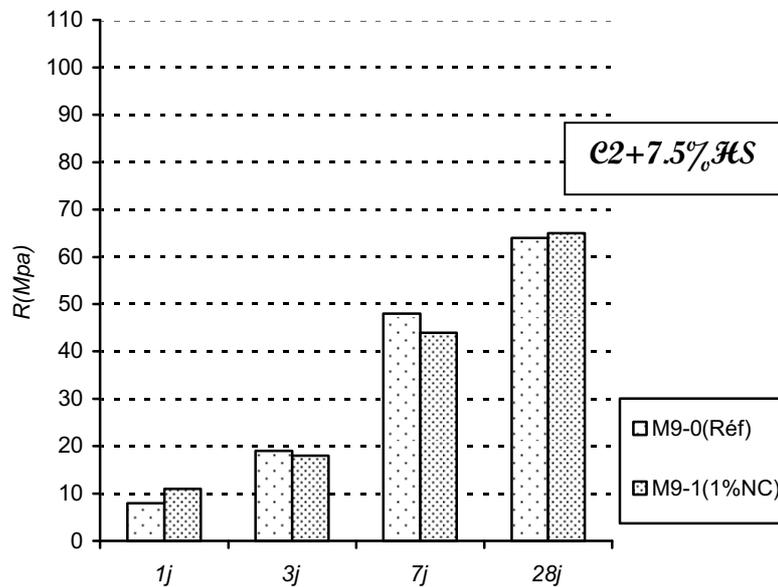


Figure 4.26 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M9-1

L'ajout de NC dans les mélanges avec substitution de 7.5% de sable HS au ciment C2, contribue à l'augmentation de la résistance mécanique au très jeune âge (soit environ 40% à 1 jours) mais n'a pas ou très peu d'effet sur celle ci au delà de cette échéance (figure 4.26).

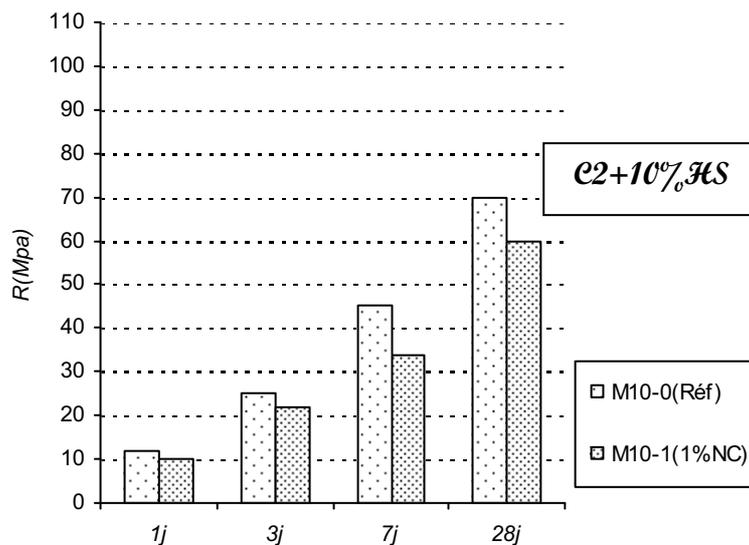


Figure 4.27 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M10-1

En revanche, la figure 4.27 montre que l'ajout de NC provoque une baisse significative des résistances mécaniques des mélanges dont on substitue 10% de sable HS au ciment C2.

d - Mélanges C2 – sable SS

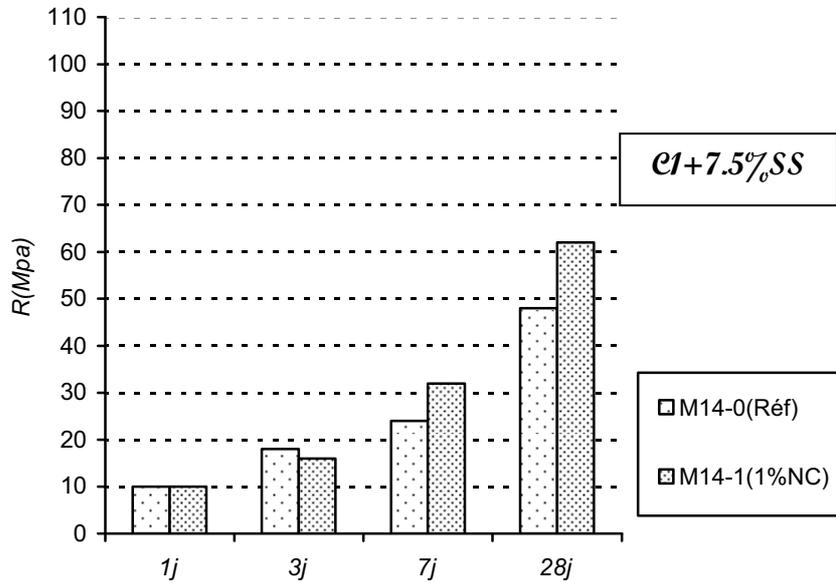


Figure 4.28 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M14-1

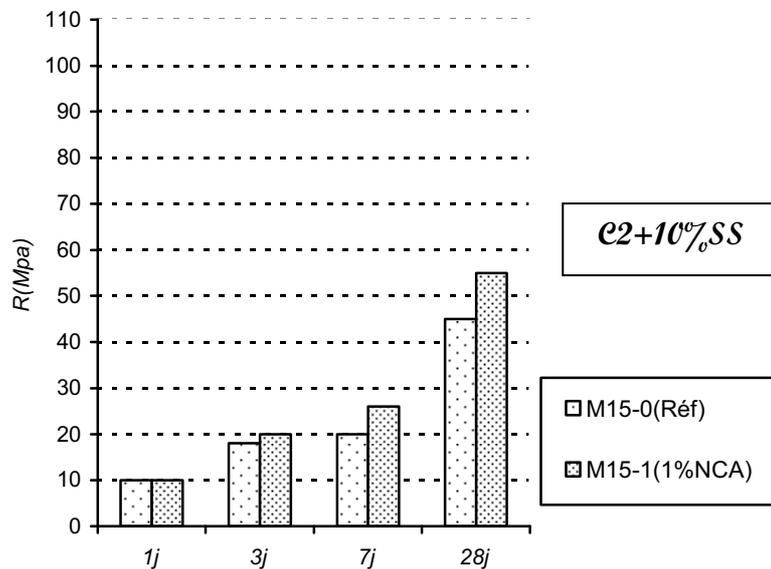


Figure 4.29: Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques - Mélange M15-1

Pour les mélanges dans lesquels nous avons substitué du sable SS au ciment C2 nous remarquons que l'introduction de NC n'a pas d'effet sur les résistances mécaniques à court terme, par contre elle conduit à une amélioration importante à plus long terme. Ainsi cette amélioration est d'environ :

Chapitre 4

- 35% et 30% respectivement à 7 et 28 jours pour une substitution de 7.5% en sable SS (figure 4.28),
- et 30%, et 20% respectivement à 7 et 28 jours pour une substitution de 10% en sable SS (figure 4.29).

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2* (M4) (100%C2)	C2-1* (M5) (C2-7.5%FS)	C2-2* (M6) (C2-10%FS)	C2-3* (M9) (C2-7.5%HS)	C2-4* (M10) (C2-10%HS)	C2-5* (M14) (C2-7.5%SS)	C2-6* (M15) (C2-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	11	20	20	8	12	10	10
	1%NC	9	24	24	11	10	10	10
	% / Réf	0.82	1.20	1.20	1.38	0.83	1.00	1.00
R3j (Mpa)	Réf	17	32	32	19	25	18	18
	1%NC	15	40	40	18	22	16	20
	% / Réf	0.88	1.25	1.25	0.95	0.88	0.89	1.11
R7j (Mpa)	Réf	35	48	48	48	45	24	20
	1%NC	29	60	64	44	34	32	26
	% / Réf	0.83	1.25	1.33	0.92	0.76	1.33	1.30
R28j (Mpa)	Réf	50	60	72	64	70	48	45
	1%NC	60	68	76	65	60	62	55
	% / Réf	1.20	1.13	1.06	1.02	0.86	1.29	1.22

** voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 4.4 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC

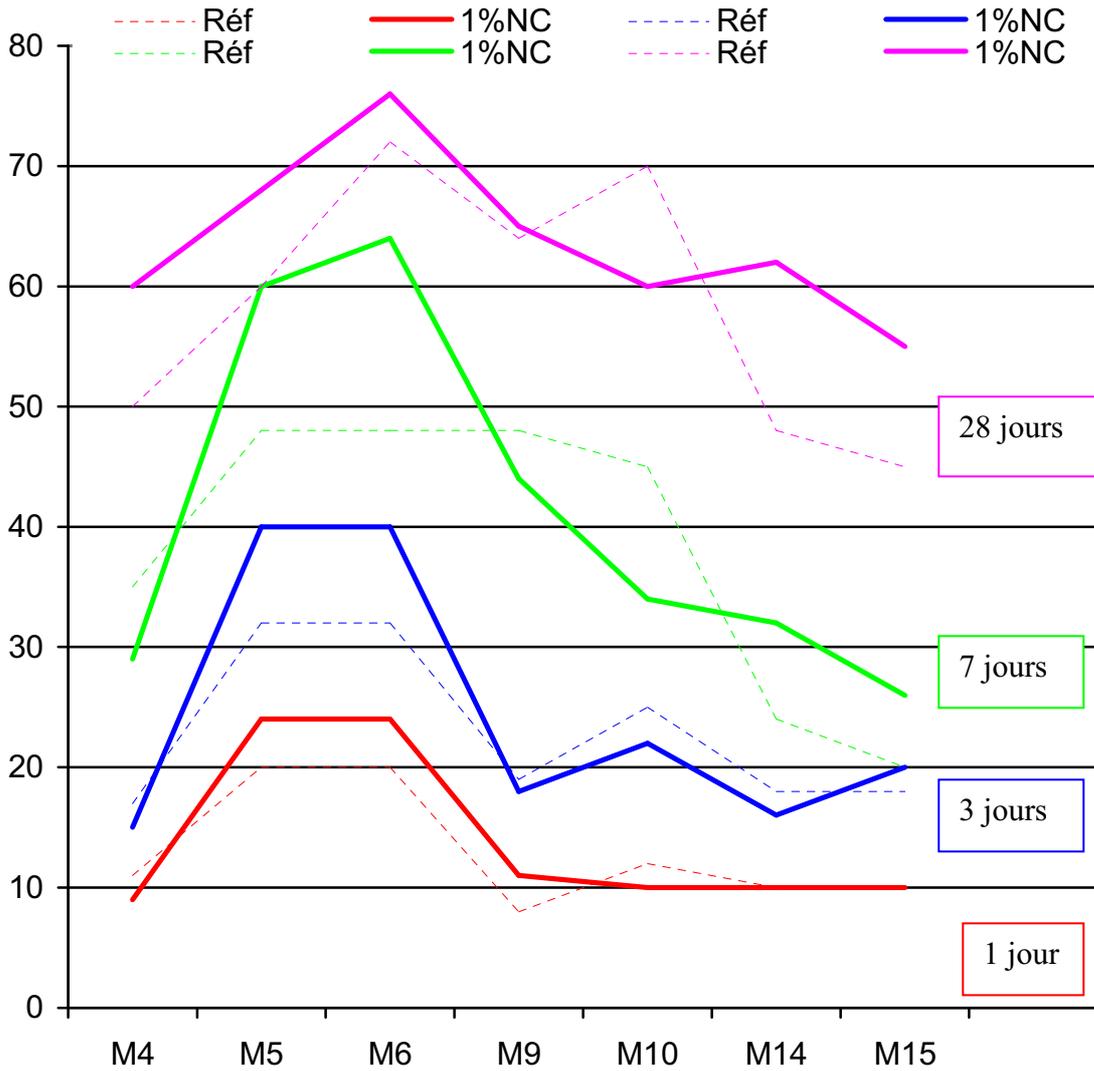


Figure 4.30 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC

D'après le tableau 4.4 et la figure 4.30, on constate que globalement l'introduction de 1% de NC améliore peu les résistances mécaniques des mélanges siliceux à base de ciment C2.

Le mélange ciment C2 avec la fumée de silice reste un cas particulier où l'on observe une amélioration des résistance mécaniques à très court terme. Cela peu être dû au fait que la fumée de silice à un effet d'accélérateur rapidement limité dans le temps. En effet les ions de calcium jouent un rôle sur la solubilité de la fumée de silice et activent son hydratation [56], [57].

4.3 Conclusion :

Le chlorure de calcium est l'accélérateur de prise dont l'usage est le plus répandu. Son emploi courant est dû au fait qu'on peut se le procurer facilement, avec un coût peu élevé, et le fait qu'il a été employé avec succès pendant plusieurs décennies.

Cependant dans de nombreux pays son emploi n'est pas recommandé pour le béton armé. Le danger de corrosion est encore plus important lorsqu'il s'agit de béton précontraint, parce que la surface totale des câbles est grande et des risques de corrosion sous contrainte sont davantage dangereux pour la sécurité de l'ouvrage, tout ces inconvénients ont conduit à le substituer par des adjuvants ne contenant pas de chlorure. A cet effet une solution de rechange consiste à utiliser du nitrate de calcium qui se comporte comme un inhibiteur de corrosion très efficace pour les bétons armés et les bétons précontraints.

Le nitrate de calcium à la teneur de 1% agit comme un accélérateur de prise à 20°C et se traduit par une amélioration de la résistance en compression au bout de 24 heures pour le ciment de base C1 [56]. Toutefois, à plus long terme, l'augmentation de cette résistance est trop faible pour qu'il soit considéré comme un accélérateur de durcissement. De plus le rôle d'accélérateur de prise du nitrate de calcium semble dépendre de la nature minéralogique du ciment

Du point de vue temps de prise l'efficacité du nitrate de calcium avec un dosage de 1% du poids de ciment est plus visible sur le ciment de base C2 faible en aluminates de calcium que sur le ciment de base C1. Son efficacité sur les mélanges à base de ciment C2 apparaît mieux sur le mélange avec 10% de sable HS (M10-1) pour lequel il conduit à une réduction du temps de début de prise de 50% et du temps de fin de prise de 25%. Alors que pour les mélanges à base de ciment C1 on constate que le nitrate de calcium est plus efficace dans le cas du mélange avec 7.5% de sable SS (M12-1) pour lequel il fait réduire le temps de début de prise d'environ 35% et le temps de fin de prise d'à peu près 25%.

Du point de vue résistance en compression le nitrate de calcium réagit mieux avec les mélanges de pâte pure à base de ciment C1 (M1-1) et avec celui à base de C2 dans lequel 7.5% de FS est introduit (M5-1). Dans le premier cas (M1-1) il fait augmenter la résistance à 1jour d'environ 50% et celle à 28 jours de 10%. Dans le deuxième cas (M5-1) on note une augmentation de la résistance d'environ 20% à 1jour et une augmentation de l'ordre de 15% pour celle à 28 jours.

CHAPITRE 5 : INFLUENCE DES ALCANOLAMINES COMME ACCELERATEURS DE DURCISSEMENT SUR LES PATES DE CIMENTS

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'influence des adjuvants organiques réputés pour leur caractère d'accélérateur de durcissement. Le choix a été porté sur deux alcanolamines, la triéthanolamine (TEA) et la triisopropanolamine (TIPA) dont les structures moléculaires sont spatiales. La structure moléculaire de la triisopropanolamine est davantage développée que celle de la triéthanolamine. Nous étudions l'influence du dosage en alcanolamine aux taux de 0.05% et 0.10% du poids de ciment sur le temps de prise et le développement des résistances mécaniques en compression à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et nous comparons leurs effets.

Cette étude constitue également une étape importante pour la suite de notre travail dans la mesure où nous souhaitons conserver les dosages en alcanolamine et étudier le processus d'hydratation en fonction du type de ciment et sa composition minéralogique à la même température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

5.1 EFFET DU DOSAGE EN TRIETHANOLAMINE (TEA)

5.1.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1

5.1.1.1 TEMPS DE PRISE

a- Pâte pure à base de C1

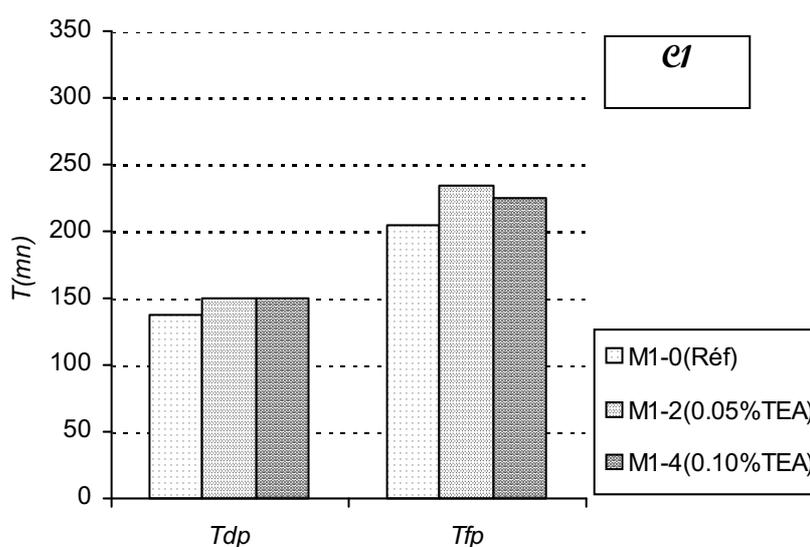


Figure 5.1 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise -Mélanges M1-2 & M1-4

La figure 5.1 montre que l'introduction d'une teneur en poids de 0.05% TEA (M1-2) fait augmenter le temps de début de prise d'environ 10% et le temps de fin de prise de 15% par rapport au mélange M1-0 [56].

L'introduction d'une quantité double (0.10%) en TEA (M1-4) conduit à une augmentation des temps de début et fin de prise d'environ 10% comparativement au mélange de référence M1-0. On remarque alors qu'il n'y a pas d'amélioration de ces deux paramètres (temps de début et de fin de prise) quand le dosage en TEA passe de 0,05% à 0,01%

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

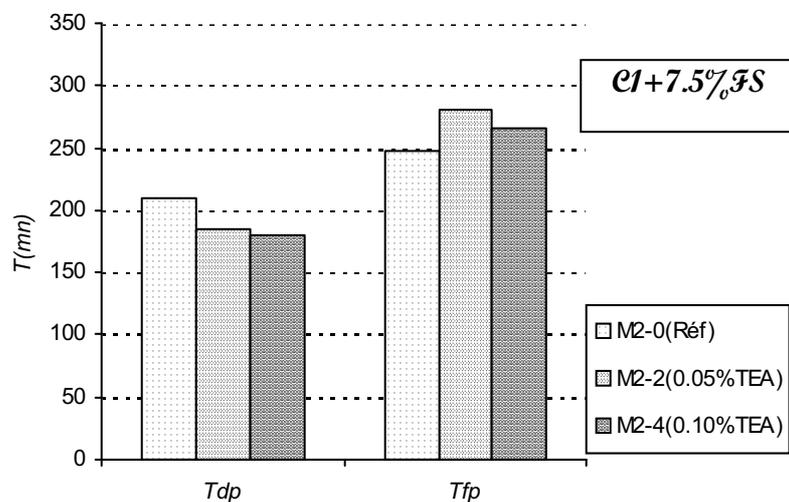


Figure 5.2 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M2-2 & M2-4

Le dosage de 0.05% TEA dans le mélange M2-2 conduit à une diminution du temps de début de prise d'environ 10% et une augmentation du temps de fin de prise d'environ 10% par rapport au mélange M2-0.

Le dosage double (0.10%) en TEA (M2-4) fait diminuer le temps de début de prise d'environ 15% et conduit à l'augmentation du temps de fin de prise d'environ 5%. Globalement, nous pouvons faire la même remarque que précédemment dans le sens où l'introduction d'un dosage plus important en TEA dans ce cas n'apporte aucune amélioration supplémentaire.

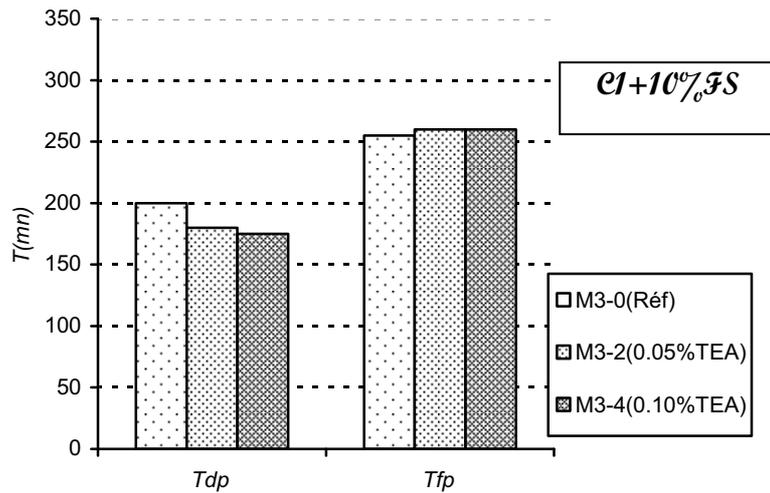


Figure 5.3 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise -Mélanges M3-2 & M3-4

L'introduction d'une quantité de 0.05% TEA dans un mélange de ciment C1 et de 10% FS (M3-2) conduit à une diminution du temps de début de prise d'environ 10% et n'a aucune influence sur le temps de fin de prise par rapport au mélange de base M3-0.

En doublant la teneur en TEA (0.10%) (M3-4), on obtient à peu près les mêmes effets soit une diminution du temps de début de prise d'environ 10% et une augmentation du temps de fin de prise d'une même valeur (10%), comparativement au mélange M3-0.

c- Mélanges C1-HS

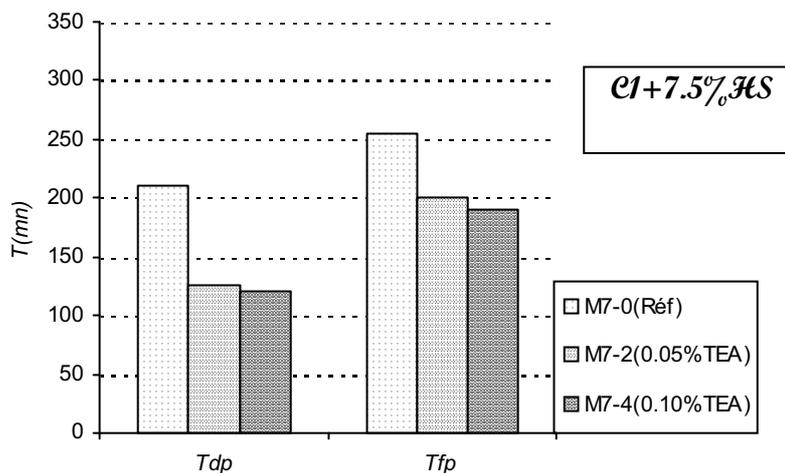


Figure 5.4 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M7-2 & M7-4

Pour le sable HS à 7,5% l'introduction d'une teneur de 0.05% de TEA (M7-2) par rapport au poids fait diminuer les temps de débuts et fin de prise respectivement d'environ 40% et 20% comparativement au mélange de base M7-0.

L'introduction d'une teneur plus importante en TEA (0.10%) (M7-4) conduit à la même amélioration pour le temps de début de prise (40%) et à une amélioration légèrement meilleure pour le temps de fin de prise (25%).

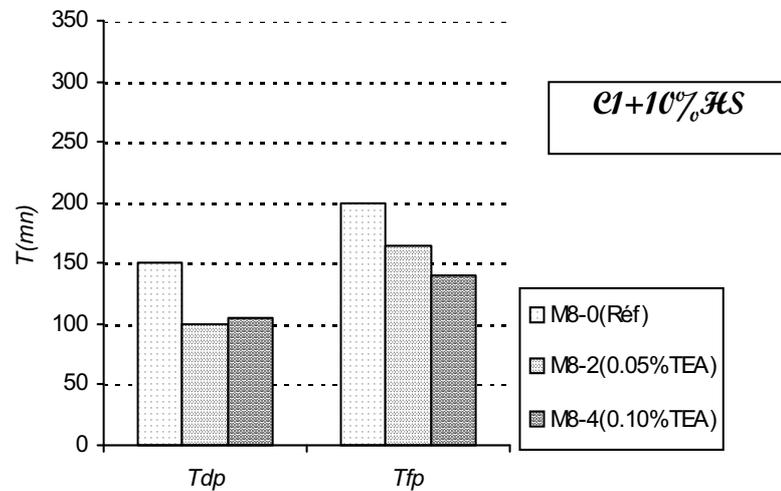


Figure 5.5 : Essai de prise ; Effet du dosage en TEA -Mélanges M8-2 & M8-4

Dans le cas du sable HS avec une substitution à 10%, l'addition de 0.05% TEA (mélange M8-2) fait diminuer le temps de début de prise d'environ 30% et le temps de fin de prise de 15% par rapport au mélange de base M8-0.

Si on augmente le dosage en TEA à 0.10%, l'amélioration du temps de début et fin de prise reste identique à celle obtenue avec 0.05% TEA.

d- Mélange C1-SS

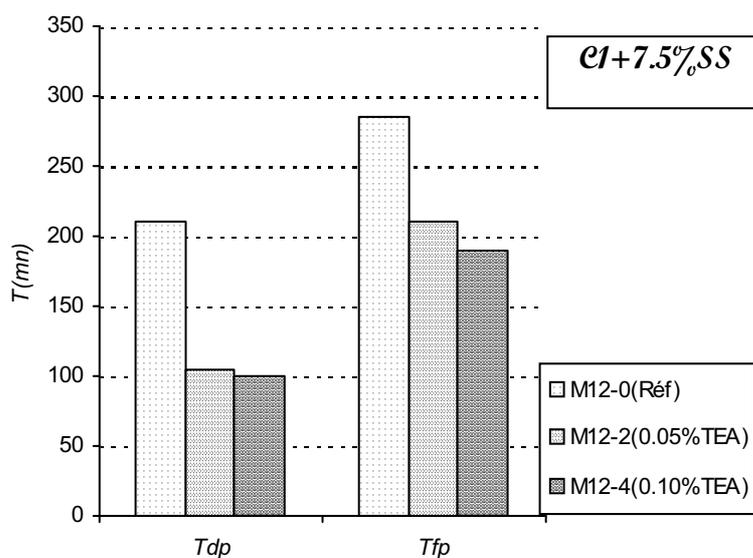


Figure 5.6 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M12-2 & M12-4

Dans le cas des mélanges avec 7,5% de sable SS, le rajout d'une quantité de 0.05% TEA (mélange M12-2) fait réduire nettement les temps de début et fin de prise, respectivement d'environ 50% et 25% comparativement au mélange de base M12-0.

Un ratio double 0.10% TEA (M12-4) conduit à une diminution des temps de début et fin de prise du même ordre que celle obtenue précédemment avec 0,05% de TEA.

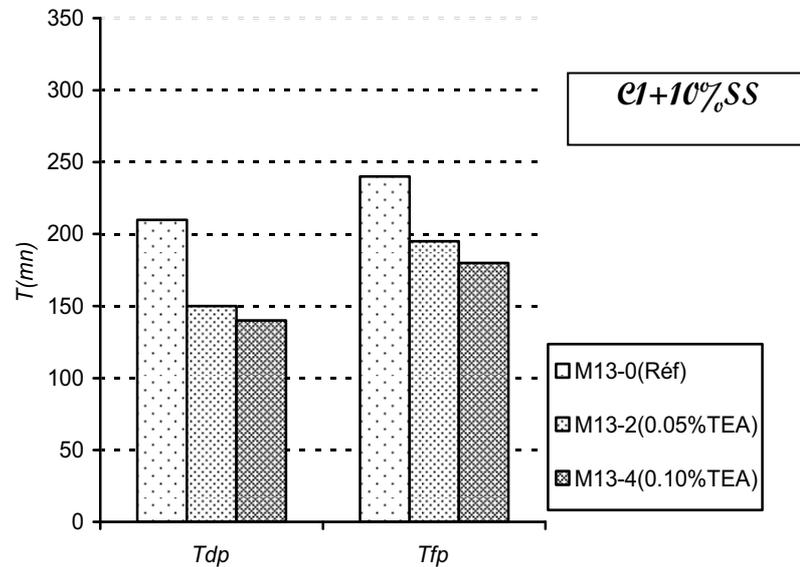


Figure 5.7 : Essai de prise ; Effet du dosage en TEA -Mélanges M13-2 & M13-4

En injectant un dosage de 0.05% TEA dans les mélanges avec 10% de sable SS (mélange M13-2), on arrive à diminuer comparativement au mélange de référence M13-0 le temps de début de prise d'environ 30% et le temps de fin de prise d'à peu près 20% (Ces mêmes ratios ont été obtenus avec l'introduction de 1% de nitrate de calcium).

En doublant le dosage en TEA (0.10% TEA) (mélange M13-4) on obtient une amélioration des temps de début et fin de prise du même ordre que celle obtenue avec le dosage de 0,05% en TEA soit environ 30% et 25% comparativement au mélange de référence M13-0.

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1* (M1) (100%C1)	C1-1* (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2* (M3) (C1-10%FS)	C1-3* (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4* (M8) (C1-10%HS)	C1-5* (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6* (M13) (C1-10%SS)
TDP (min)	Réf	137	210	200	210	150	210	210
	0.05%TEA	150	185	180	125	100	105	150
	% / Réf	109	88	90	60	67	50	71
	0.10%TEA	150	180	175	120	105	100	140
	% / Réf	109	86	88	57	70	48	67
TFP (min)	Réf	205	247	255	255	200	285	240
	0.05%TEA	235	280	260	200	165	210	195
	% / Réf	115	113	102	78	83	74	81
	0.10%TEA	225	265	260	190	140	190	180
	% / Réf	110	107	102	75	70	67	75

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.1 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de TEA

On remarque que la triéthanolamine fait augmenter le temps de début et fin de prise du ciment de base C1 avec des valeurs comprises entre 10 et 15% pour les teneurs de 0.05% et 0.10% du poids du ciment. A l'inverse, elle conduit à une amélioration des temps de début et fin de prise des mélanges à base de ciment C1 avec additions siliceuses.

On remarque également que le fait de doubler le dosage en TEA ne conduit pas à plus d'amélioration des temps de début et fin de prise.

On peut noter que le mélange M12 (C1-7.5%SS) possède les meilleures performances de prise où les temps de début et fin de prise sont réduits à des valeurs comprises entre 30 et 50% de la valeur de référence, suivi du mélange M13 (C1-7.5%SS) avec des valeurs comprises entre 20 et 40%.

5.1.1.2 RESISTANCES MECANIQUES

Dans cette partie nous allons reprendre tous les mélanges précédemment étudiés pour examiner leurs résistances mécaniques notamment à très court terme.

a- Pâte pure à base de C1

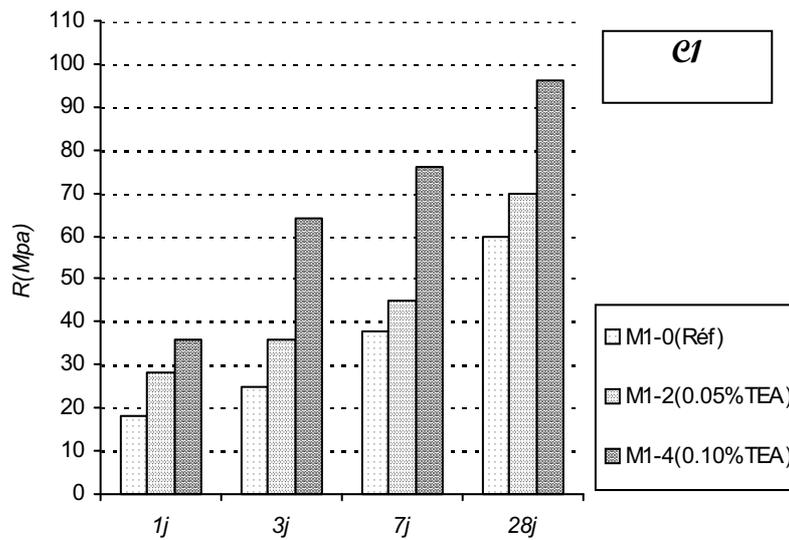


Figure 5.8 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M1-2 & M1-4

Pour le mélange de pâte pure à base du ciment C1, l'introduction d'une teneur de 0.05% en TEA (M1-2) provoque une augmentation de la résistance à la compression respectivement d'environ 55% à 1jour, 45% à 3jours, 20% à 7 et 28 jours par rapport aux résistances obtenues sur le mélange de référence M1-0.

Une teneur double équivalente à 0.10% en TEA (M1-4) introduite fait augmenter la résistance en compression respectivement d'environ 100% à 1jour et 7 jours, de 155% à 3 jours et de 60% à 28 jours comparativement aux résistances du mélange de base M1-0.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

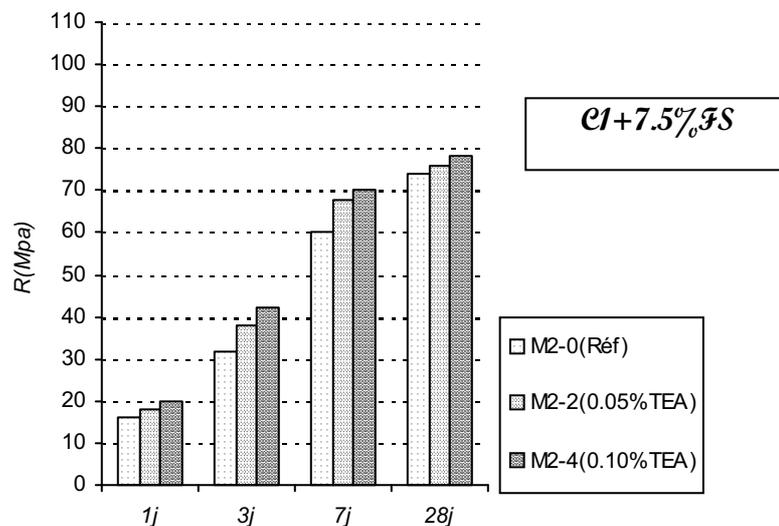


Figure 5.9 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances - Mélange M2-2 & M2-4

Pour les mélanges à base du ciment C1 avec une substitution de 7,5 de fumée de silice (FS) l'ajout d'une teneur de 0.05% de TEA (M2-2) par rapport au poids du mélange conduit à une augmentation de la résistance en compression respectivement d'environ 10% à 1jour, 20% à 3jours, 10% à 7jours et 5% à 28 jours.

L'introduction d'une teneur double équivalente à 0.10% TEA (M2-4) dans le même mélange fait améliorer un peu plus la résistance au jeune âge par rapport à celle obtenue avec 0,05% de TEA et n'a pas d'effet sur celle à 28 jours. Ainsi la résistance croît respectivement d'environ 25% à 1jour, 30% à 3 jours, 15% à 7 jours et de 5% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues sur le mélange de référence.

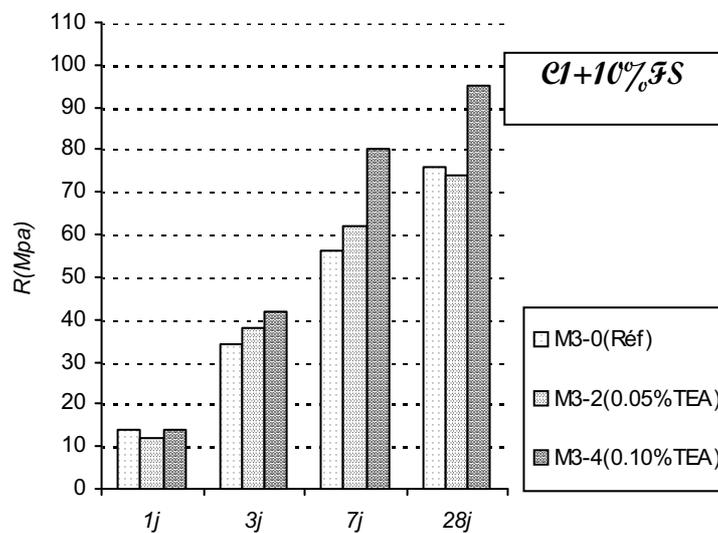


Figure 5.10 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances - Mélange M3-2 & M3-4

L'addition d'une quantité de 0.05% TEA dans les mélanges à base de C1 et une substitution de 10% de FS (M3-2) conduit à la diminution de la résistance en compression d'environ 15% à 1jour et 10% à 28 jours et l'augmentation de celle-ci de 20% à 3jours et 5% à 7jours en comparaison aux résistances obtenues avec le mélange de référence M3-0.

L'introduction d'une teneur double de 0.10% TEA dans ces mélanges (M3-4) fait augmenter la résistance respectivement d'environ 25% à 3 jours, 40% à 7 jours et de 30% à 28 jours. Elle n'influe pas sur la résistance à 1jour, comparativement à celle du mélange M3-0.

c- Mélanges C1- sable HS

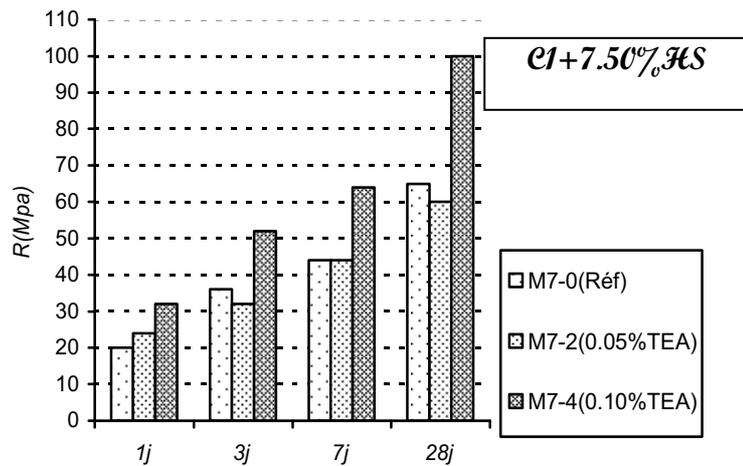


Figure 5.11 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances - Mélange M7-2 & M7-4

Le dosage de 0.05% en TEA dans les mélanges avec substitution de 7,5 % de sable HS (M7-2) provoque une augmentation de la résistance d'environ 20% à 1jour, et une diminution respective d'environ 10% à 3 et 28jours comparativement aux résistances obtenues avec le mélange de référence (M7-0). L'utilisation d'un dosage double de 0.10% TEA (M7-4) fait croître la résistance respectivement d'environ 60% à 1jour, 45% à 3 et 7 jours et de 55% à 28 jours.

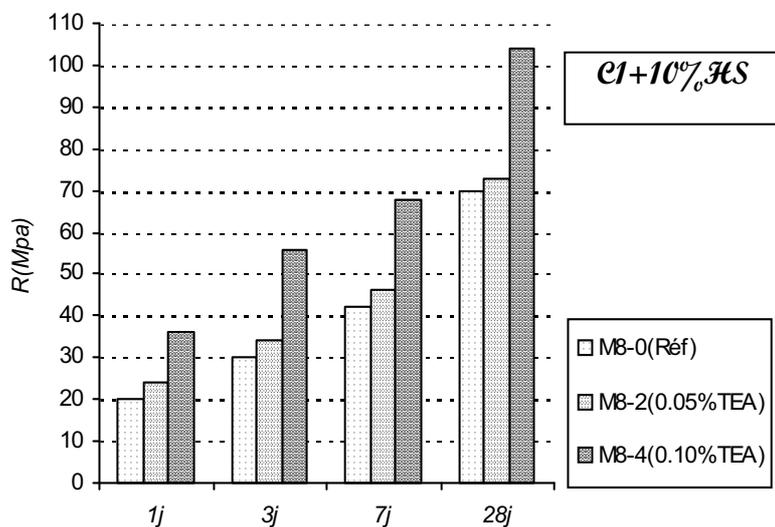


Figure 5.12 : Essai de résistance ; Effet du dosage en TEA -Mélange M8-2 & M8-4

Dans les mélanges avec une substitution de 10% de sable HS, l'ajout d'un taux de 0.05% de TEA (M8-2) par rapport au poids du mélange M8-0 conduit à l'augmentation de la résistance en compression d'environ 20% à 1jour, 10% à et 7jours et 5% à 28 jours par comparaison aux résistances du mélange de référence M8-0.

Le passage à un taux double de 0.10% en TEA (M8-4) fait accentuer l'augmentation des résistances et conduit à des valeurs respectives d'environ 80% à 1 et 3 jours, 60% à 7 jours et de 50% à 28 jours comparées à celles du mélange de référence.

d- Mélanges C1- sable SS

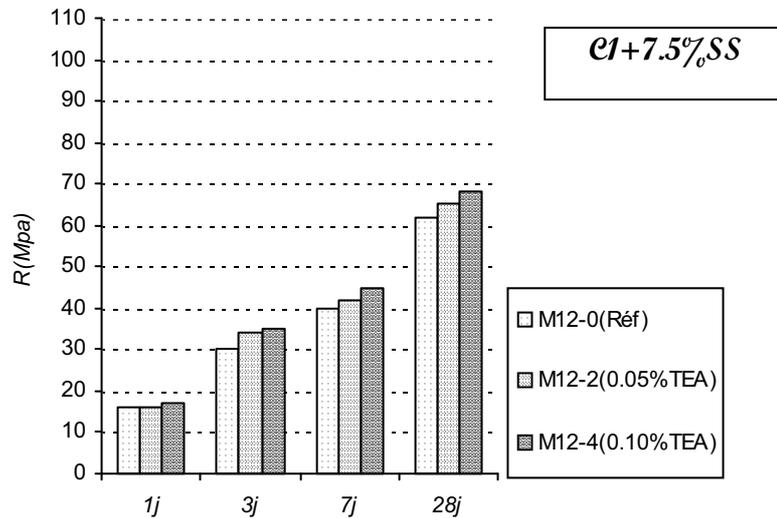


Figure 5.13 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M12-2 & M12-4

Dans les mélanges avec 7,5% de sable SS, l'ajout d'un taux de 0.05% en TEA (M12-2) par rapport au mélange M12-0 conduit à l'accroissement de la résistance respectivement d'environ 10% à 3 jours, 5% à 7 jours et 28 jours et n'a pas d'effet sur celle à 1 jour.

En doublant ce taux à 0.10% TEA (M12-4), on fait augmenter la résistance respectivement d'environ 5% à 1 jour, 15% à 3 jours, 10% à 7 et 28 jours comparativement aux résistances obtenues sur le mélange M12-0.

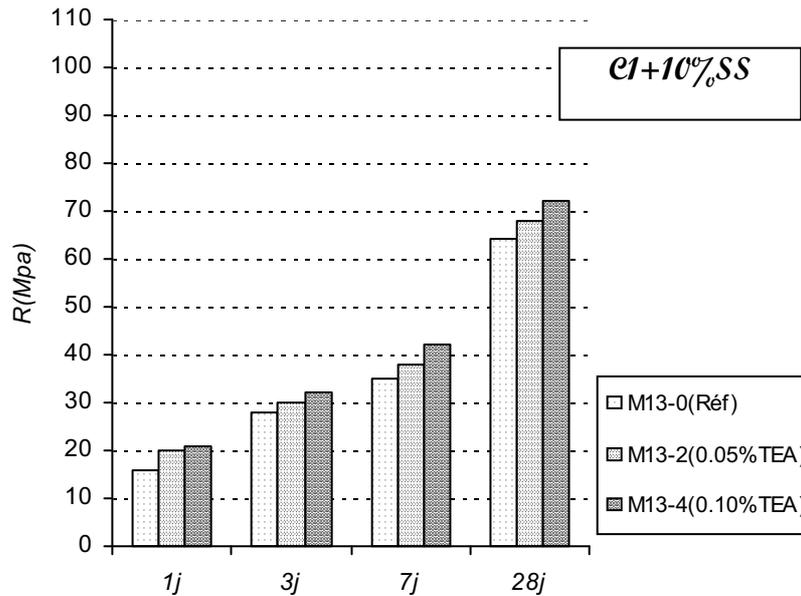


Figure 5.14 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M13-2 & M13-4

Pour les mélanges avec 10% de sable SS, l'ajout de 0.05% de TEA (M13-2) fait augmenter les résistances mécaniques respectivement d'environ 25% à 1jour, 5% à 3jours, 10% à 7jours et 5% à 28 jours en comparaison avec celles obtenues sur le mélange de référence (M13-0) .

Le passage à un taux double de 0.10% de TEA (M13-4) fait augmenter la résistance en compression respectivement d'environ 30% à 1jour, 15% à 3 jours, 20% à 7 jours et de 10% à 28 jours par comparaison à celles du mélange M13-0.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1* (M1) (100%C1)	C1-1* (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2* (M3) (C1-10%FS)	C1-3* (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4* (M8) (C1-10%HS)	C1-5* (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6* (M13) (C1-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	18	16	14	20	20	16	16
	0.05%TEA	28	18	12	24	24	16	20
	% / Réf	1.56	1.13	0.86	1.20	1.20	1.00	1.25
	0.10%TEA	36	20	14	32	36	17	21
	% / Réf	2.00	1.25	1.00	1.60	1.80	1.06	1.31
R3j (Mpa)	Réf	25	32	34	36	30	30	28
	0.05%TEA	36	38	40	32	34	34	30
	% / Réf	1.44	1.19	1.18	0.89	1.13	1.13	1.07
	0.10%TEA	64	42	42	52	56	35	32
	% / Réf	2.56	1.31	1.24	1.44	1.87	1.17	1.14
R7j (Mpa)	Réf	38	60	56	44	42	40	35
	0.05%TEA	45	68	58	44	46	42	38
	% / Réf	1.18	1.13	1.04	1.00	1.10	1.05	1.09
	0.10%TEA	76	70	80	64	68	45	42
	% / Réf	2.00	1.17	1.43	1.45	1.62	1.13	1.20
R28j (Mpa)	Réf	60	74	76	65	70	62	64
	0.05%TEA	70	76	70	60	73	65	68
	% / Réf	1.17	1.03	0.92	0.92	1.04	1.05	1.06
	0.10%TEA	96	78	98	100	104	68	72
	% / Réf	1.60	1.05	1.29	1.54	1.49	1.10	1.13

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.2 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1, effet de TEA

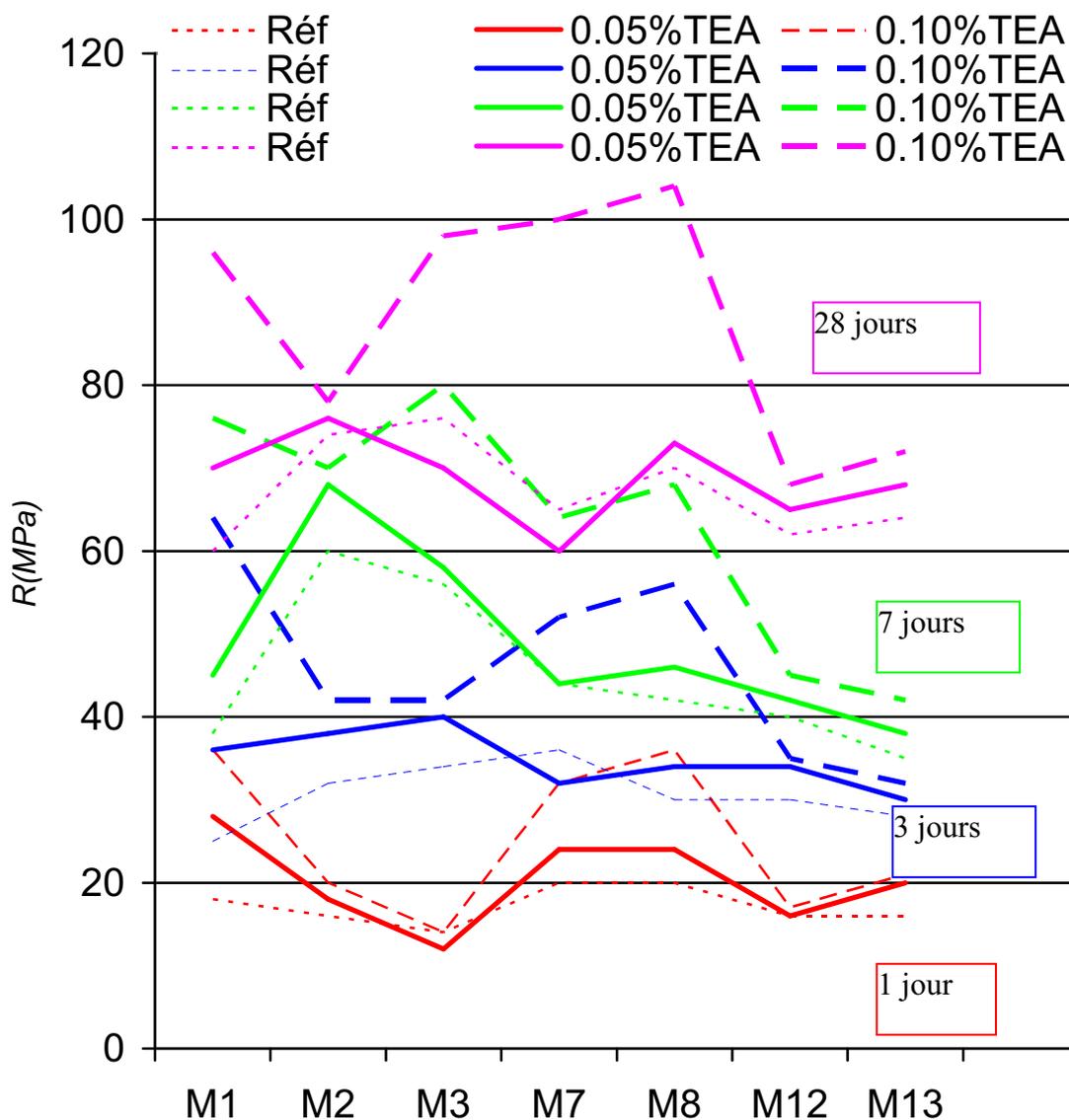


Figure 5.15 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1, effet de TEA

D'après le tableau 5.2 et la figure 5.15 on remarque que la triéthanolamine est plus efficace avec le mélange de base M1 (pâte de ciment pure) à toutes les échéances qu'avec les mélanges avec additions siliceuses où elle conduit à l'augmentation des résistances d'environ 55 à 100% à 1 jour, 40 à 150% à 3 jours, 20 à 100% à 7 jours et 15 à 60% à 28 jours.

A l'âge de 1 jour, 0.05% de TEA fait augmenter la résistance d'environ 10 à 55%. Cette augmentation est d'environ 10% pour le mélange M2, 20% pour les mélanges M7, M8 et M13 et 55% pour le mélange M1. Alors que pour un dosage double de TEA (0.10%) l'accroissement de résistance varie entre 25 et 100%. Il est d'environ 25% pour M2, 30% pour M13, 60% pour M7, 80% pour M8 et 100% pour M1.

Chapitre 5

A l'âge de 3 jours, 0.05% de TEA fait augmenter la résistance d'environ 5 à 40%. Cette augmentation est d'environ 5% pour le mélange M13, 10% pour les mélanges M8 et M12, 20% pour les mélanges M2 et M3 et 40% pour le mélange M1. Alors que pour un dosage double de TEA (0.10%) l'accroissement de résistance varie entre 10 et 155%. Il est d'environ 10% pour M13, 20% pour M3 et M12, 40% pour M7, 85% pour M8 et 155% pour M1.

A l'âge de 7 jours 0.05% de TEA conduit à une augmentation de la résistance entre 5 et 20%. Cette augmentation est d'environ 5% pour les mélanges M3 et M12, 10% pour les mélanges M2, M8 et M13 et 20% pour le mélange M1. Alors que pour un dosage double de TEA (0.10%) l'accroissement de résistance varie entre 10 et 100%. Il est d'environ 10% pour M12, 20% pour M2 et M13, 45% pour M3 et M7, 60% pour M8 et 100% pour M1.

A l'âge de 28 jours 0.05% de TEA fait accroître la résistance d'environ 5 à 15%. Cette augmentation est d'environ 5% pour les mélanges M2, M8, M12 et M13 et elle est 20% pour le mélange M1. Alors que pour un dosage double de TEA (0.10%) l'accroissement de résistance varie entre 5 et 60%. Il est de 5% pour M2, 10% pour M12 et M13, 30% pour M3, 50% pour M7 et M8 et 60% pour M1.

Le fait de passer à un dosage double de la triéthanolamine (0.10%) fait croître la résistance mécanique d'une façon remarquable pour tous les mélanges étudiés et à toutes les échéances.

A l'échéance de 1 jour cet accroissement varie entre 5 et 60%. Il est d'environ 5% pour les mélanges M12 et M13, 10% pour les mélanges M2 et M3, 40% pour le mélange M7, 45% pour le mélange M1 et 60% pour le mélange M8.

A 3 jours d'échéance la variation de résistance induite par le passage à un ratio double de TEA varie entre 5 et 110%. Elle est d'environ 5% pour les mélanges M3 et M12, 10% pour les mélanges M2 et M13, 55% pour le mélange M7, 70% pour le mélange M8 et 110% pour le mélange M1.

A l'âge de 7 jours l'accroissement provoqué par le passage à un ratio double de TEA varie entre 5 et 80%. Il est d'environ 5% pour les mélanges M2 et M12, de 10% pour M13, 40% pour M3, 45% pour M7, 50% pour M8 et 80% pour M1.

Pour l'âge de 28 jours cet accroissement créé par le passage à un dosage double (0.10%) de TEA varie de 5 à 60%. Il est d'environ 5% pour M12, 10% pour M13, 40% pour M1, M3 et M8 et 60% pour M7.

Tout ce qui précède confirme le caractère d'accélérateur de durcissement de la triéthanolamine en plus du caractère d'accélérateur de prise pour les mélanges avec additions siliceuses tels que M7, M8, M12, et M13 ce qui nous conduit à conseiller les constructeurs sur son utilisation pour les éléments préfabriqués et pour le décoffrage rapide des éléments de structures.

5.1.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2

5.1.2.1 TEMPS DE PRISE

Nous examinons ici l'effet de la triéthanolamine sur les temps de début et fin de prise des mélanges à base du ciment C2 seul et des mélanges avec fumée de silice (FS), sable HS et sable SS substitués à une partie du ciment C2.

a- pâte pure à base de C2

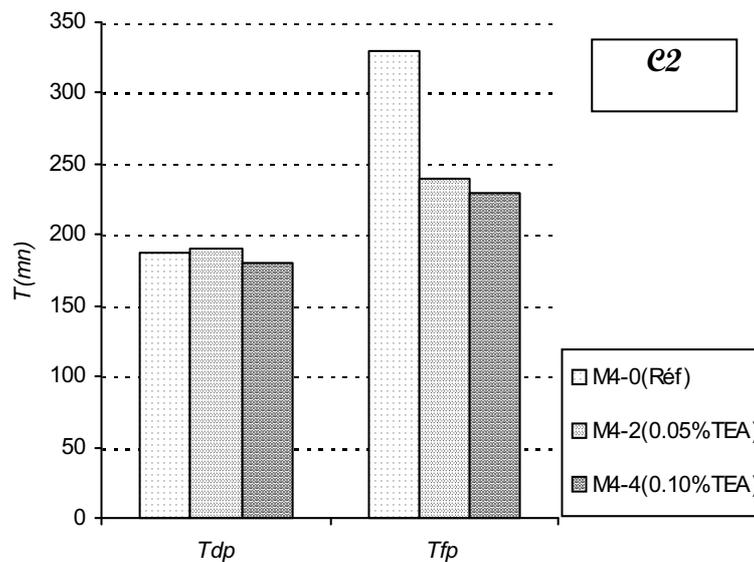


Figure 5-16 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise -Mélanges M4-2 & M4-4

En introduisant un dosage de 0.05% de TEA par rapport au poids du mélange à base du ciment C2 seul (M4-2) on fait augmenter le temps de fin de prise d'environ 25% par rapport au mélange de base (M4-0).

Une teneur double 0.10% en TEA rajoutée (M4-4) conduit à diminuer respectivement les temps de début et de fin de prise d'environ 5% et 30%. Ainsi, on remarque que le TEA quel que soit son dosage agit sur le temps de fin de prise et n'a pratiquement pas d'effet sur le temps de début de prise.

b- Mélanges C2- fumée de silice (FS)

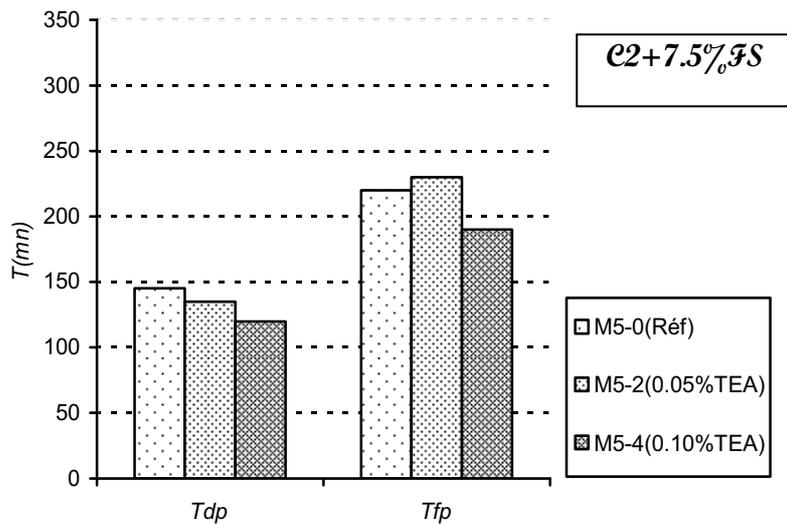


Figure 5.17: Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélange M5-2 & M5-4

Dans les mélanges avec 7,5% de FS, l'addition d'une quantité de 0.05% de TEA (mélange M5-2) mène à une diminution du temps de début de prise d'environ 5% et une augmentation de celui de fin de prise de 5% par rapport au mélange de référence (M5-0).

Dans le mélange M5-4 obtenu par l'addition de 0.10% TEA les temps de début et fin de prise sont réduits d'environ 15% par rapport au mélange de référence M5-0.

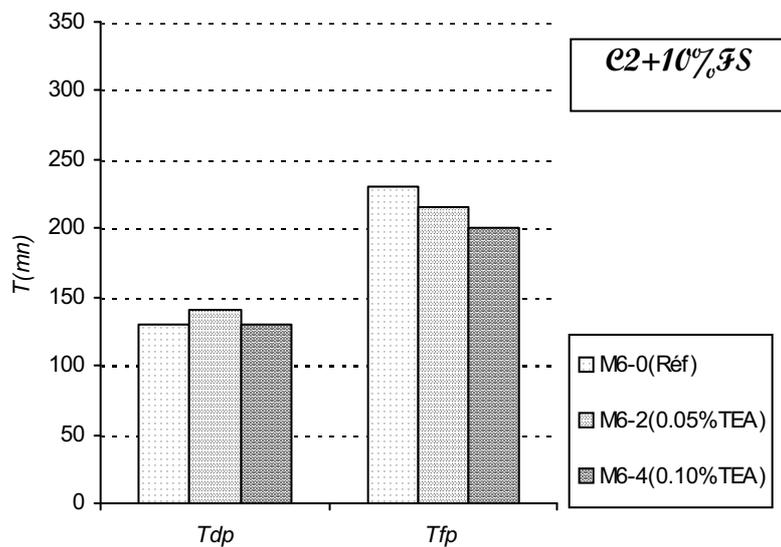


Figure 5.18 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M6-2 & M6-4

Pour les mélanges avec une substitution de 10% de FS, l'injection d'une teneur de 0.05% TEA (M6-2) par rapport au poids du mélange de référence (M6-0) fait accroître les temps de début et fin de

prise d'environ 10%. Une teneur double 0.10% de TEA (M6-4) fait diminuer le temps de fin de prise d'environ 15% et n'apporte aucun changement sur le temps de début de prise.

c- Mélanges C2- sable HS

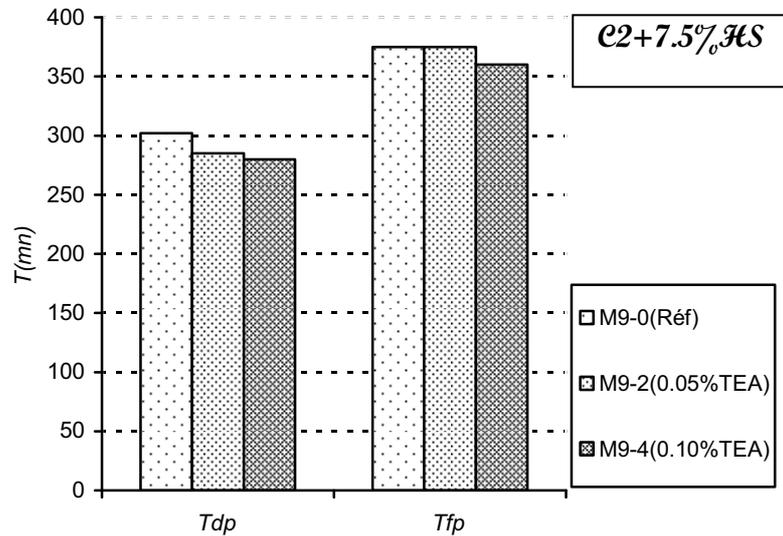


Figure 5.19 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M9-2 & M9-4

Dans le cas des mélanges avec 7,5% de sable HS, ajouter un taux de 0.05% TEA (M9-2) par rapport au mélange de référence (M9-0) conduit à réduire le temps de début de prise d'environ 5% et n'apporte aucun changement sur la fin de prise comparativement aux temps de début et fin de prise du mélange M9-0. Si on double ce taux (0.10% TEA) (mélange M9-4), on fait réduire respectivement les temps de début de fin de prise d'environ 10% et 5% par rapport à ceux du mélange de référence.

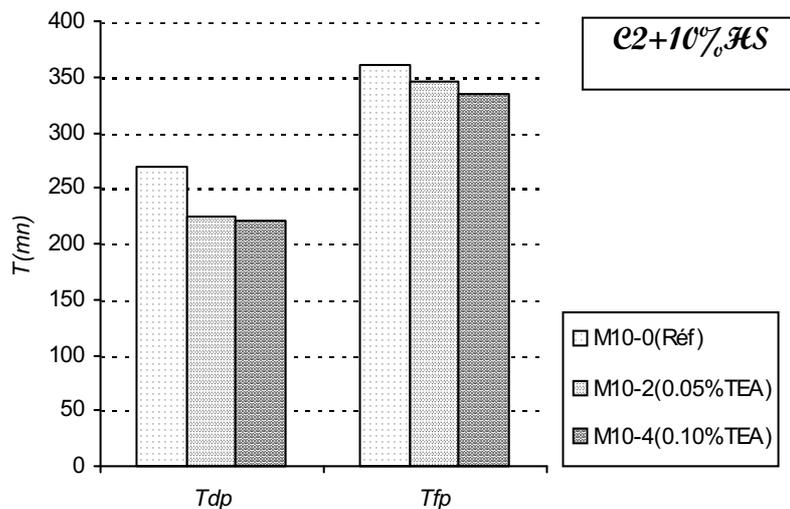


Figure 5.20 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélange M10-2 & M10-4

Pour les mélanges avec 10% de sable HS, une quantité de 0.05% TEA (M10-2) par rapport au poids du mélange conduit à une diminution des temps de début et fin de prise respective d'environ 20% et 5% par rapport au mélange de base M10-0. En doublant cette quantité (0.10% TEA), on arrive à diminuer un peu plus le temps de fin de prise (20% par rapport à la référence), le temps de début de prise diminue de la même valeur que celle obtenue précédemment soit 10% par rapport à la référence.

d- Mélanges C2- sable SS

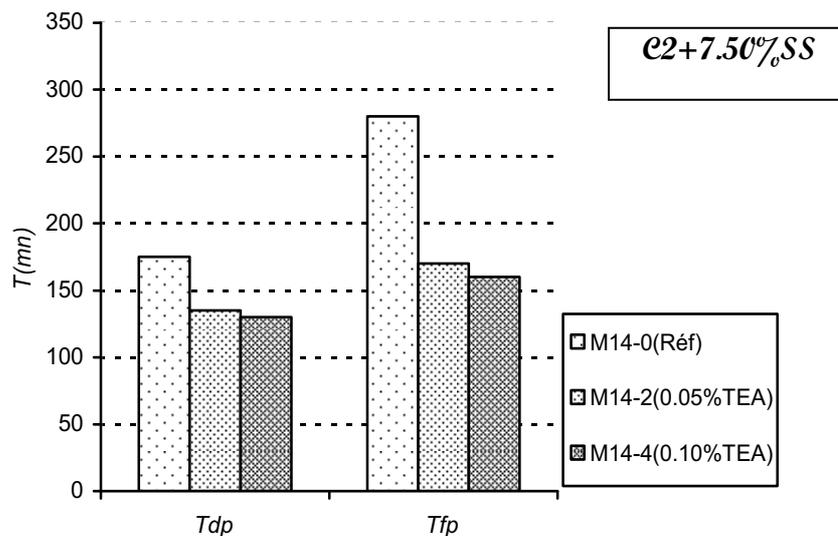


Figure 5.21 : Essai de prise ; Effet du dosage en TEA -Mélange M14-2 & M14-4

Concernant les mélanges avec 7,5% de sable SS, l'introduction de 0.05% de TEA (M14-2) en poids du mélange fait réduire les temps de début et fin de prise respectivement d'environ 25% et 40% par rapport au mélange de base (M14-0).

En doublant ce ratio (0.10%) de TEA (M14-4), on arrive pratiquement aux mêmes résultats que précédemment, soit une diminution des temps de début et fin de prise respective d'environ 25% et 45%. Donc l'influence des deux dosages sur les temps de début et de fin de prise n'est pas significativement différente.

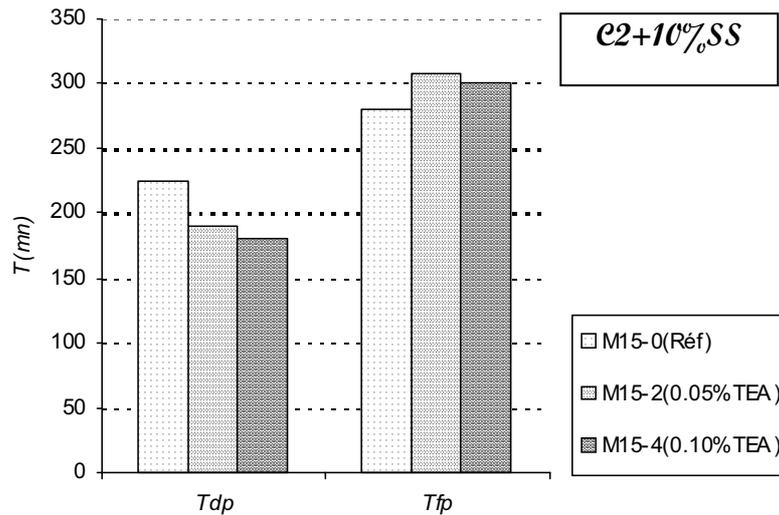


Figure 5.22 : Effet du dosage en TEA sur le temps de prise - Mélanges M15-2 & M15-4

Pour les mélanges avec 10% de sable SS l'addition de 0.05% TEA par rapport au poids du mélange (M15-2) contribue à réduire le temps de début de prise d'environ 15% et à augmenter celui de fin de prise de 10% par rapport à ceux obtenus avec le mélange de référence (M15-0).

Une teneur double de 0.10% TEA provoque un effet similaire en diminuant le temps de début de prise d'environ 20% et en augmentant le temps de fin de prise de 10% par rapport à la référence.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2*	C2-1*	C2-2*	C2-3*	C2-4*	C2-5*	C2-6*
		(M4) (100%C2)	(M5) (C2-7.5%FS)	(M6) (C2-10%FS)	(M9) (C2-7.5%HS)	(M10) (C2-10%HS)	(M14) (C2-7.5%SS)	(M15) (C2-10%SS)
TDP (min)	Réf	188	145	130	302	270	175	225
	0.05%TEA	190	135	140	285	225	135	190
	% / Réf	101	93	108	94	83	77	84
	0.10%TEA	180	120	130	280	220	130	180
	% / Réf	96	83	100	93	81	76	80
	TFP (min)	Réf	330	220	230	375	360	280
0.05%TEA		240	230	215	375	345	170	309
% / Réf		73	105	93	100	96	61	110
0.10%TEA		230	190	200	360	335	160	300
% / Réf		70	86	87	96	93	57	107

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.3 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de TEA

Le tableau 5.3 regroupe les résultats précédemment détaillés et montre globalement que :

1. la réduction des temps de début de fin de prise est plus ou moins du même ordre pour les deux dosages en TEA.
2. le mélange le plus performant reste celui auquel on a substitué 7.5% de sable siliceux SS au ciment C2 (C2-7.5%SS).
3. le TEA, quel que soit son dosage n'influe pas sur le temps de début de prise du mélange avec ciment pur C2 mais agit plus sur le temps de fin de prise en le réduisant d'environ 30% pour les deux dosages (0.05 et 0.10% TEA).

5.1.2.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C2

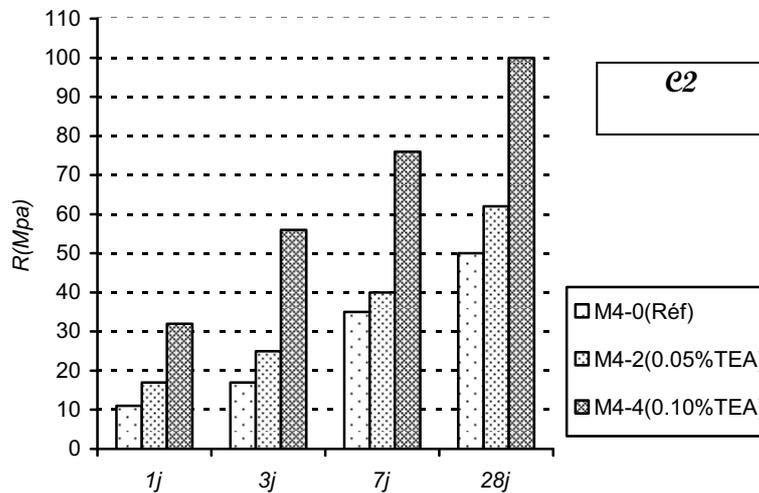


Figure 5.23 Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M4-2 & M4-4

On remarque que l'introduction d'une teneur de 0.05% de TEA (M4-2) par rapport au poids du mélange conduit à augmenter significativement la résistance de la pâte pure du ciment C2 avec des valeurs d'environ 55% à 1jour, 45% à 3jours, 15% à 7jours et 25% à 28 jours comparativement à celles du mélange M4-0.

On remarque également que le fait de doubler cette teneur en TEA (M4-4) fait croître considérablement la résistance en compression. Ainsi, les valeurs sont améliorées d'environ 190% à 1jour, 230% à 3 jours, 115% à 7 jours et de 100% à 28 jours par rapport aux valeurs de résistance obtenues avec le mélange de référence M4-0.

b – Mélanges C2 – fumée de silice (FS)

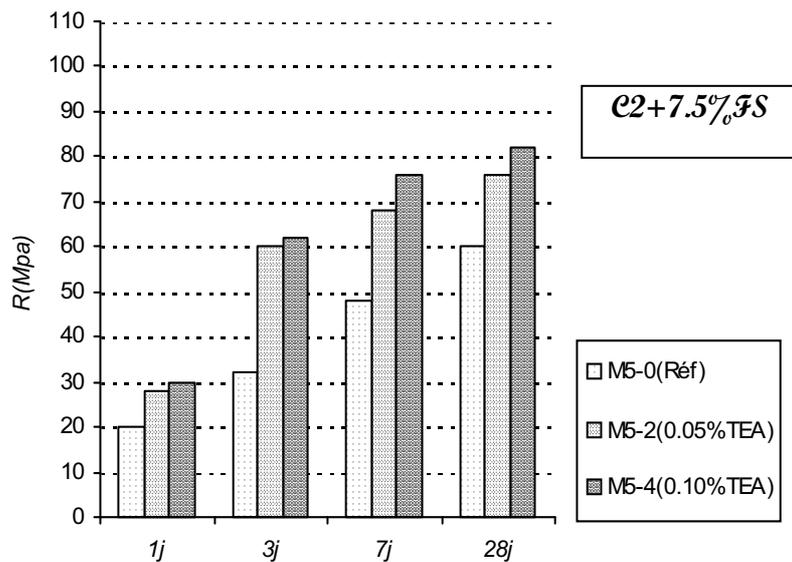


Figure 5.24 Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M5-2 & M5-4

Concernant les mélanges avec substitution de 7,5% de FS, l'introduction de 0.05% de TEA dans ces mélanges (M5-2) conduit à augmenter la résistance en compression d'environ 40% à 1jour, 90% à 3jours, 40% à 7jours et 25% à 28 jours par rapport à celles du mélange de référence (M5-0). L'utilisation d'un dosage double de 0.10% de TEA fait augmenter encore un peu plus les valeurs de la résistance en compression pour obtenir des évolutions d'environ 50% à 1jour, 95% à 3 jours, 60% à 7 jours et de 35% à 28 jours comparativement à celles du mélange de référence.

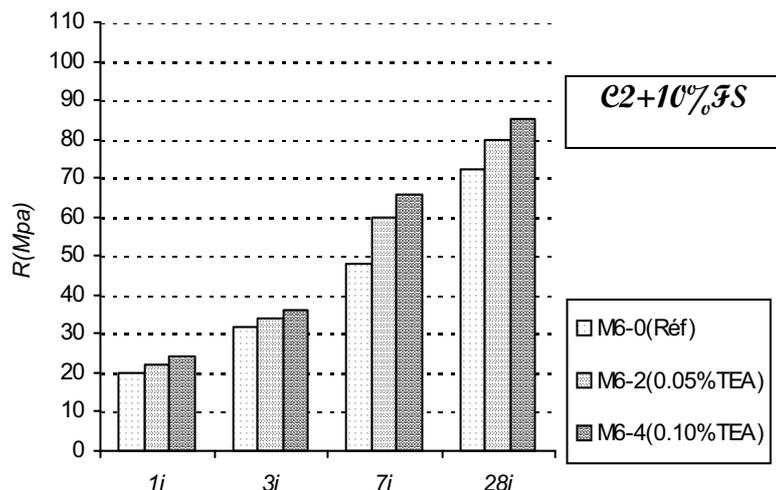


Figure 5.25 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélange M6-2 & M6-4

D'après la figure 5.25 l'addition d'une quantité de 0.05% de TEA dans les mélanges avec substitution de 10% de FS (M-62) conduit à accroître la résistance mécanique en compression

d'environ 10% à 1jour, 5% à 3jours ,25% à 7jours et 10% à 28 jours comparées à celles obtenues sur le mélange de référence.

L'utilisation d'une quantité double équivalente à 0.10% en TEA (M6-4) conduit à un accroissement de la résistance d'environ 20% à 1jour, 15% à 3 jours, 40% à 7 jours et de 20% à 28 jours par rapport au mélange M6-0.

c - Mélanges C2 – sable HS

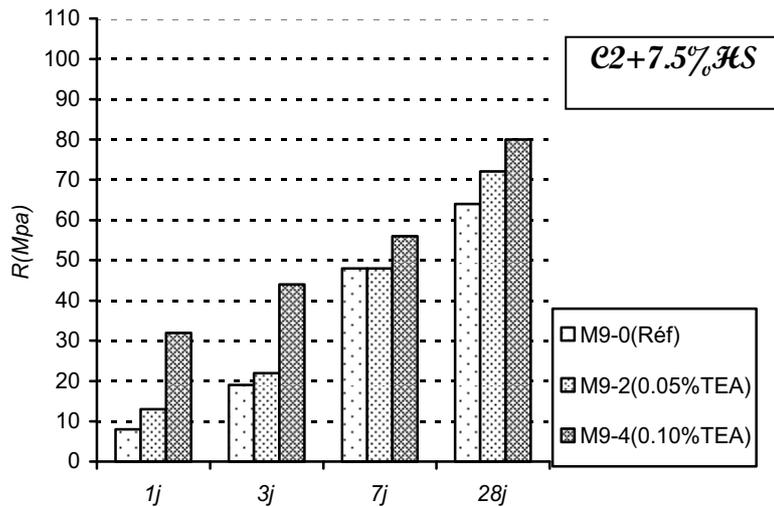


Figure 5.26 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M9-2 & M9-4

D'après la figure 5.26, on s'aperçoit qu'une teneur de 0.05% de TEA introduite dans les mélanges à 7,5% de sable HS (M9-2) engendre une augmentation de la résistance en compression d'environ 65% à 1jour, 15% à 3jours et 25% à 28 jours par rapport au mélange de référence (M9-0).

Un ratio double de TEA (0.10%) (M9-4) fait accentuer le développement des résistances en compression en les augmentant d'environ 300% à 1jour, 130% à 3 jours, 15% à 7 jours et de 25% à 28 jours par rapport au mélange M9-0.

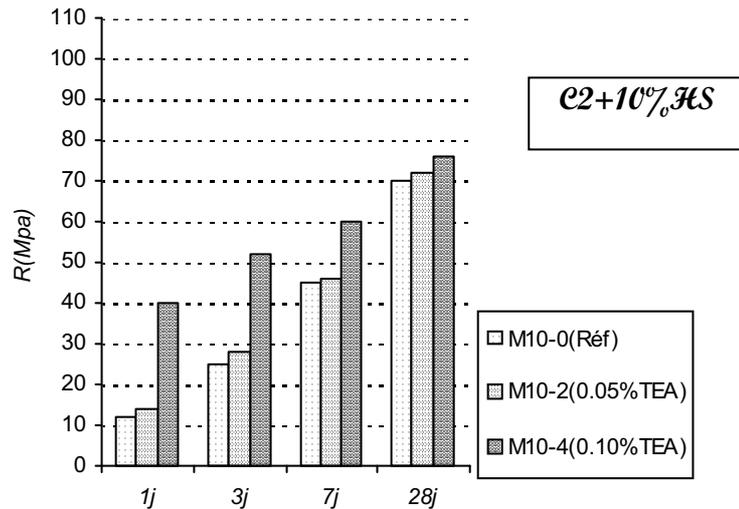


Figure 5.27 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M10-2 & M10-4

Dans les mélanges à 10% de sable HS, la teneur de 0.05% de TEA (M10-2) conduit à une augmentation de la résistance en compression d'environ 15% à 1jour, 10% à 3jours, et ne change pas celles à 7 et 28 jours par rapport mélange de base (M10-0).

En doublant cette teneur à 0.10% TEA (M10-4) on fait augmenter de façon accentuée les résistances à court terme d'environ 230% à 1jour, 105% à 3 jours et d'une manière modérée pour les autres échéances avec des valeurs d'environ 30% à 7 jours et de 10% à 28 jours par rapport à celles du mélange M10-0.

d - Mélanges C2 – sable SS

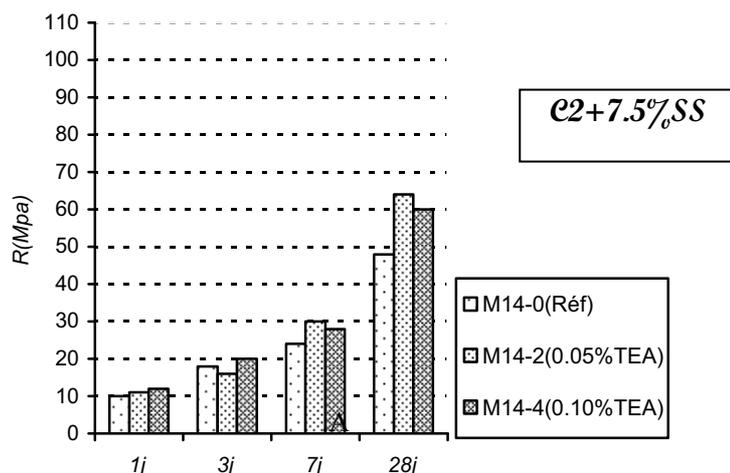


Figure 5.28 : Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélanges M14-2 & M14-4

Concernant maintenant les mélanges avec 7,5% de sable SS, l'introduction d'un taux de 0.05% de TEA (M14-2) par rapport au poids du mélange fait augmenter la résistance en compression

d'environ 10% à 1jour, 25% à 7jours et 35% à 28 jours, avec une légère diminution de la résistance (10%) à 3 jours par rapport à la référence (M14-0).

En doublant ce ratio à 0.10% de TEA on fait augmenter la résistance d'environ 20% à 1jour, 10% à 3 jours, 15% à 7 jours et de 25% à 28 jours par rapport aux valeurs de M14-0.

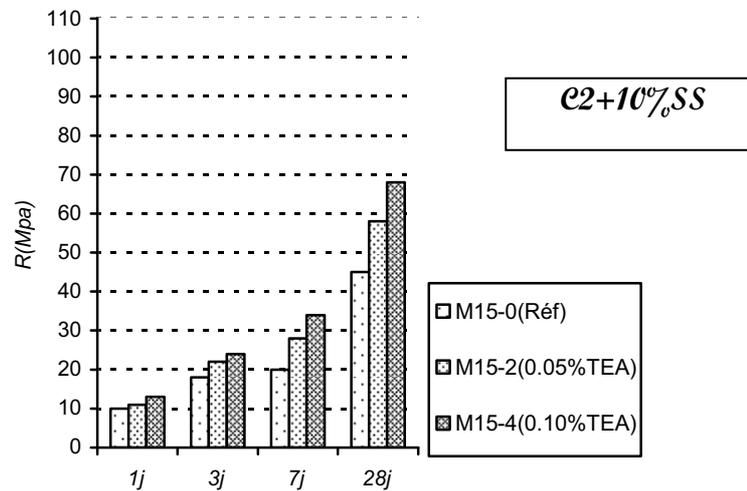


Figure 5.29 Effet du dosage en TEA sur le développement des résistances -Mélange M15-2 & M15-4

Pour les mélanges avec 10% de sable SS, l'ajout de 0.05% de TEA (M15-2) contribue à l'accroissement de la résistance en compression d'environ 10% à 1jour, 20% à 3jours, 40% à 7jours et 30% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues sur le mélange de référence (M15-0).

Une teneur double de 0.10% de TEA conduit au même phénomène avec des valeurs encore plus élevées soit une augmentation de la résistance d'environ 30% à 1jour, 35% à 3 jours, 70% à 7 jours et de 50% à 28 jours par rapport aux valeurs obtenues avec M15-0.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2*	C2-1*	C2-2*	C2-3*	C2-4*	C2-5*	C2-6*
		(M4)	(M5)	(M6)	(M9)	(M10)	(M14)	(M15)
		(100%C2)	(C2-7.5%FS)	(C2-10%FS)	(C2-7.5%HS)	(C2-10%HS)	(C2-7.5%SS)	(C2-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	11	20	20	8	12	10	10
	0.05%TEA	17	28	22	13	14	11	11
	% / Réf	1.54	1.40	1.10	1.63	1.17	1.10	1.10
	0.10%TEA	32	30	24	32	40	12	13
	% / Réf	2.91	1.50	1.20	4.00	3.33	1.20	1.30
R3j (Mpa)	Réf	17	32	32	19	25	18	18
	0.05%TEA	25	60	34	22	28	16	22
	% / Réf	1.47	1.88	1.06	1.16	1.12	0.89	1.22
	0.10%TEA	56	62	36	44	52	20	24
	% / Réf	3.29	1.94	1.13	2.32	2.08	1.11	1.33
R7j (Mpa)	Réf	35	48	48	48	45	24	20
	0.05%TEA	40	68	60	48	46	30	28
	% / Réf	1.14	1.42	1.25	1.00	1.02	1.25	1.40
	0.10%TEA	76	76	66	56	60	28	34
	% / Réf	2.17	1.58	1.38	1.17	1.33	1.17	1.70
R28j (Mpa)	Réf	50	60	72	64	70	48	45
	0.05%TEA	62	76	80	72	72	64	58
	% / Réf	1.24	1.27	1.11	1.13	1.03	1.33	1.29
	0.10%TEA	100	82	85	80	76	60	68
	% / Réf	2.00	1.37	1.18	1.25	1.09	1.25	1.51

** voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.4 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TEA

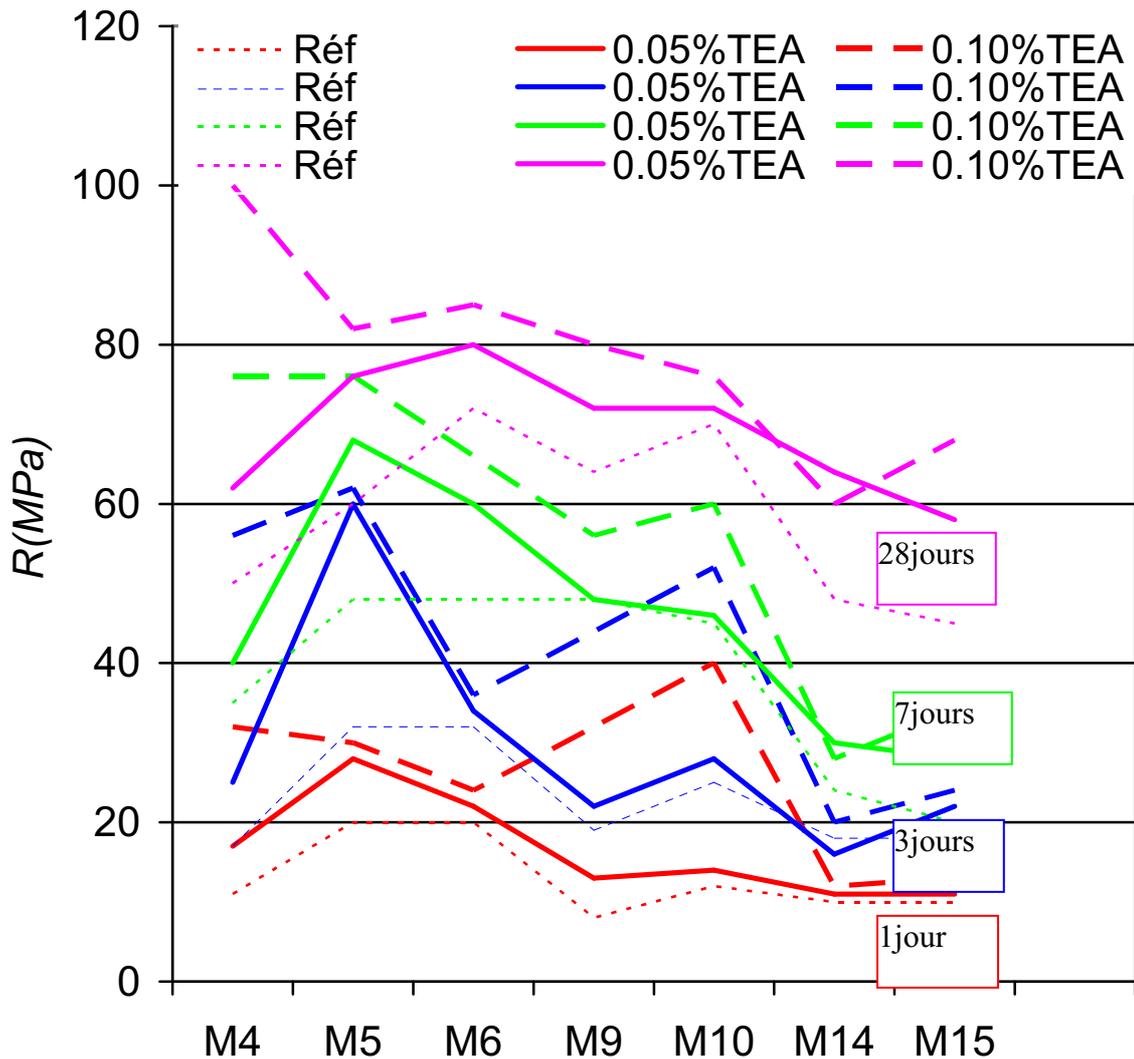


Figure 5.30 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TEA

D'après le tableau 5.4 et la figure 5.30 on s'aperçoit que la triéthanolamine est plus efficace avec le mélange de base M4 (pâte de ciment pure) ainsi qu'avec les mélanges avec additions siliceuses. Elle conduit à l'augmentation des résistances pour la pâte pure d'environ 55 à 190% à 1 jour, 45 à 220% à 3 jours, 10 à 110% à 7 jours et 20 à 100% à 28 jours. Pour les mélanges avec 7.5% de fumée de silice (M5) cette amélioration est d'environ 40 à 50% à 1 jour, 80 à 90% à 3 jours, 40 à 60% à 7 jours et 25 à 35% à 28 jours. Avec 10% de fumée de silice (M6) les résultats sont plus modérés et varient en moyenne entre 5 et 25%. Les mélanges avec sables siliceux HS donnent des résultats très intéressants à court terme où l'addition de TEA contribue à l'augmentation des résultats des résistances mécaniques entre 20 et 200% à 1 jour, 10 et 100% à 3 jours, 5 à 30% à 7 jours et 5 à 25%

à 28 jours. Les mélanges avec sable siliceux SS donnent des résultats intéressants au delà du court terme et se traduisent par une amélioration de la résistance d'environ 10 à 30% à 1 jour, 10 à 20% à 3 jours, 10 à 70% à 7 jours et 25 à 30% à 28 jours.

Le fait de passer à un dosage double de triéthanolamine (0.10%) fait croître la résistance mécanique d'une façon très remarquable pour tous les mélanges étudiés et à toutes les échéances.

Le TEA agit beaucoup mieux avec le ciment C2 qu'avec le ciment C1. Il joue nettement son rôle d'accélérateur de prise et de durcissement.

Les mélanges les plus performants restent la pâte pure et les mélanges avec sable siliceux HS et fumée de silice au dosage de 7.5%.

5.2 EFFET DU DOSAGE EN TRIISOPROPANOLAMINE (TIPA)

Nous allons examiner dans ce qui suit les effets de la triisopropanolamine sur les temps de prise et sur les résistances mécaniques en compression des mélanges à base des ciments purs C1 et C2 et des mélanges avec substitution de fumée de silice (FS), de sable siliceux HS et de sable siliceux SS à une partie du ciment C1 ou C2.

5.2.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1

5.2.1.1 TEMPS DE PRISE

a- Pâte pure à base de C1

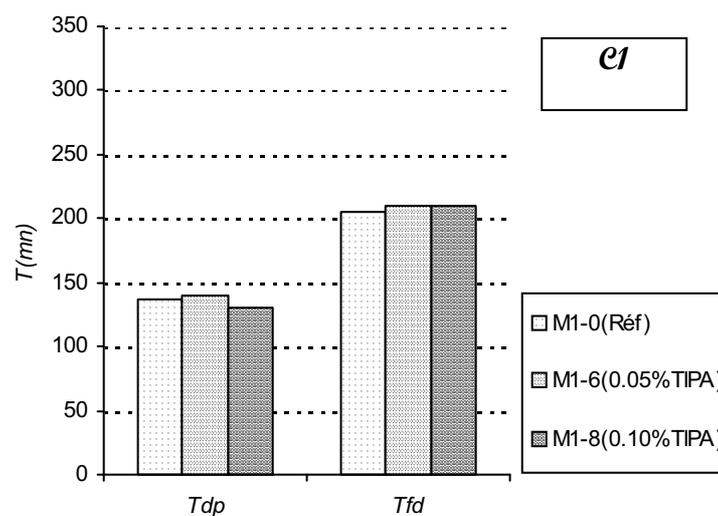


Figure 5.31 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M1-6 & M1-8

L'introduction d'une teneur de 0.05% TIPA dans un mélange de pâte pure à base de ciment C1 (M1-6) n'a pas d'effet sur les temps de début et fin de prise. Par contre l'introduction d'une quantité double 0.10% TIPA (M1-8) conduit à une diminution du temps de début de prise d'environ 5% et n'influe pas sur le temps de fin de prise.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

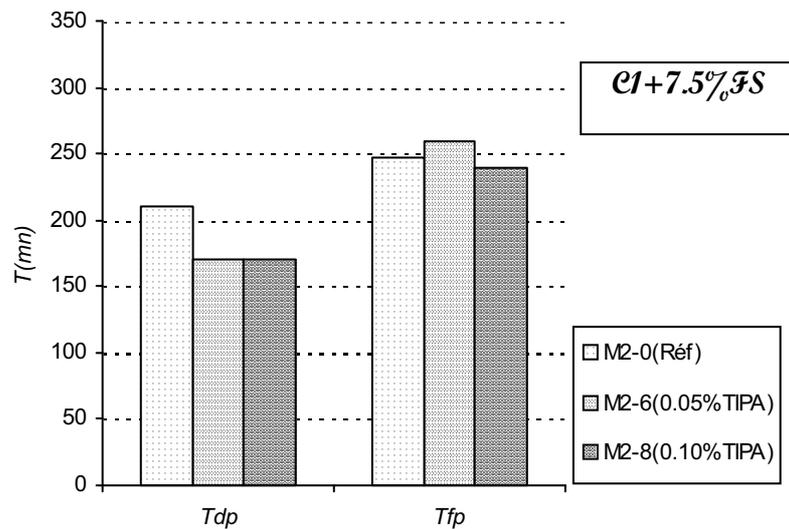


Figure 5.32 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M2-6 & M2-8

Dans les mélanges à 7,5% de FS, le dosage de 0.05% TIPA (mélange M2-6) fait diminuer le temps de début de prise d'environ 20% et fait augmenter le temps de fin de prise d'environ 5% par rapport au mélange M2-0. Alors qu'un double dosage de 0.10% TIPA (M2-8) conduit à une diminution plus importante du temps de début de prise soit 20% environ par rapport à la valeur de M2-0 mais n'améliore pas mieux le temps de fin de prise (5% d'augmentation comparativement au temps obtenu avec M2-0).

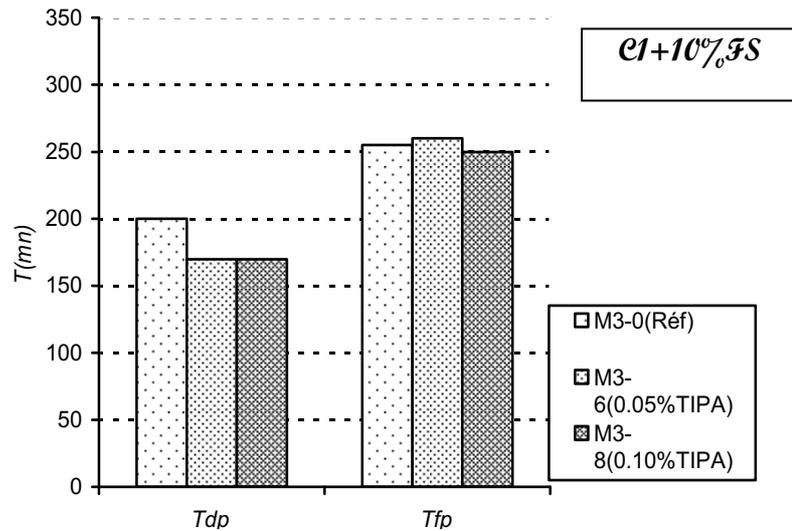


Figure 5.33 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M3-6 & M3-8

La figure 5.33 montre que lorsque la TIPA est ajoutée aux mélanges ayant 10% de FS (M3-6 pour 0,05% de TIPA et M3-8 pour 0,1% de TIPA), on observe une diminution du temps de début de prise d'environ 15% par rapport au mélange de base (M3-0). Les temps de fin de prise ne sont pratiquement pas influencés dans les deux cas pour les deux dosages en TIPA.

c- Mélanges C1-HS

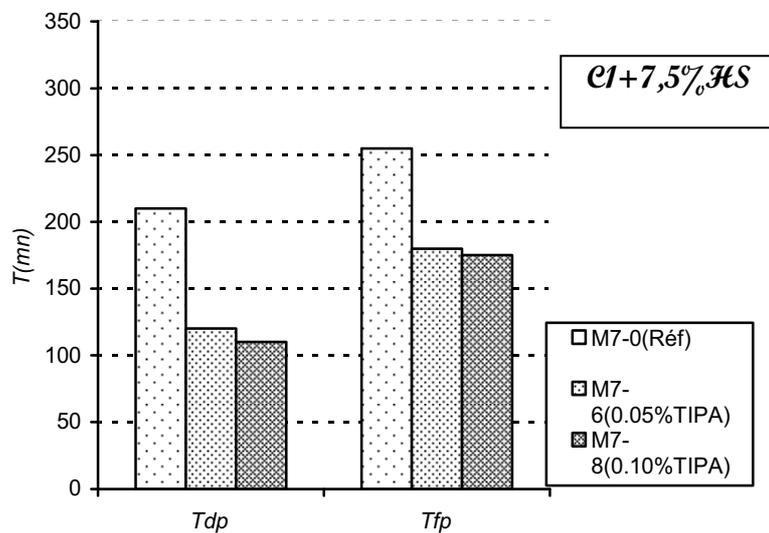


Figure 5.34 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M7-6 & M7-8

En introduisant une teneur de 0.05% de TIPA dans les mélanges à 7,5% de sable HS (M7-6) on fait diminuer notablement les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 45% et 30% par rapport au mélange de base M7-0.

Une teneur double de 0.10% TIPA (M7-8) introduite dans les mêmes mélanges fait diminuer d'une façon similaire les temps de début et fin de prise avec des valeurs respectives d'environ 50% 30% par rapport au mélange M7-0.

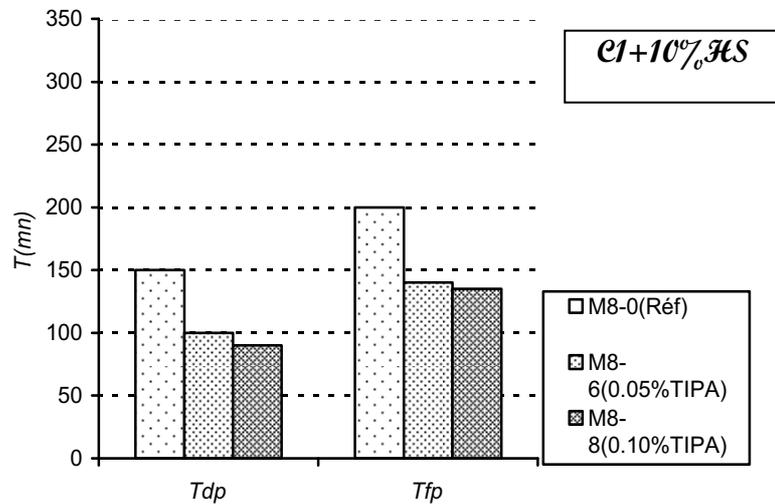


Figure 5.35 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M8-6 & M8-8

Pour les mélanges ayant 10% de sable HS, l'addition de 0.05% TIPA (M8-6) contribue à une réduction respective des temps de début et de fin de prise d'environ 35% et 30% comparativement au mélange de base M8-0.

Une teneur double de 0.10% TIPA (M8-8) fait diminuer du même ordre les temps de début et fin de prise avec des valeurs d'environ 40% et 30% par rapport à M8-0.

d- Mélange C1-SS

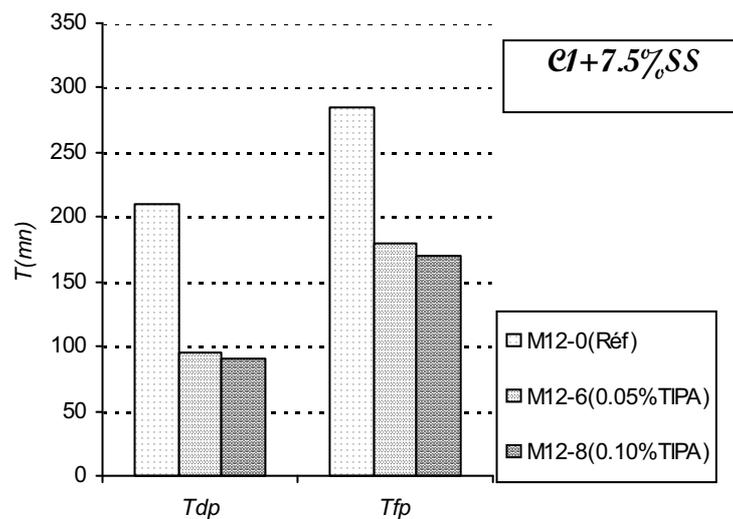


Figure 5.36 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M12-6 & M12-8

Pour les mélanges de 7,5% de sable SS, l'ajout d'une quantité de 0.05% TIPA (M12-6) fait réduire respectivement les temps de début et de fin de prise aux alentours de 55% et 30% par rapport au mélange de base M12-0.

Un ratio double 0.10% TIPA introduit dans ces mêmes mélanges (M12-8) fait diminuer respectivement les temps de début et fin de prise de la même manière avec des valeurs d'environ 50% et 40% par rapport au mélange de référence (M12-0).

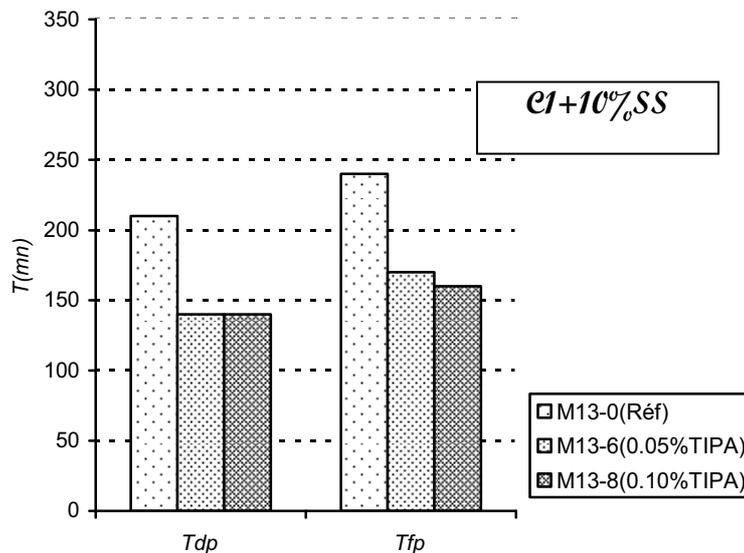


Figure 5.37 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M13-6 & M13-8

Dans le cas des mélanges à 10% de sable SS, l'injection d'un dosage de 0.05% TIPA par rapport (M13-0) conduit à diminuer les temps de début et fin de prise respectivement d'environ 35% et 30% par rapport au mélange de base M13.0.

Un dosage double de 0.10% TIPA (M13-8) fait diminuer les temps de début et de fin de prise pratiquement du même ordre que précédemment soit environ 35% par rapport au mélange M13-0.

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1* (M1) <small>(100%C1)</small>	C1-1* (M2) <small>(C1-7.5%FS)</small>	C1-2* (M3) <small>(C1-10%FS)</small>	C1-3* (M7) <small>(C1-7.5%HS)</small>	C1-4* (M8) <small>(C1-10%HS)</small>	C1-5* (M12) <small>(C1-7.5%SS)</small>	C1-6* (M13) <small>(C1-10%SS)</small>
TDP (min)	Réf	137	210	200	210	150	210	210
	0.05%TIPA	140	170	170	120	100	95	140
	% / Réf	102	81	85	57	67	45	67
	0.10%TIPA	130	170	170	110	90	90	140
	% / Réf	95	81	85	52	60	43	67
TFP (min)	Réf	205	247	255	255	200	285	240
	0.05%TIPA	210	260	260	180	140	180	170
	% / Réf	102	105	102	71	70	63	71
	0.10%TIPA	210	240	250	175	135	170	160
	% / Réf	102	97	98	69	68	60	67

* voir la définition des mélanges §chap.II

Tableau 5.5: Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de TIPA

On remarque que la triisopropanolamine n'a pas d'influence sur les temps de début et de fin de prise de la pâte pure à base du ciment C1, en revanche elle améliore les temps de prise des autres mélanges notamment ceux avec substitution de sable.

5.2.1.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C1

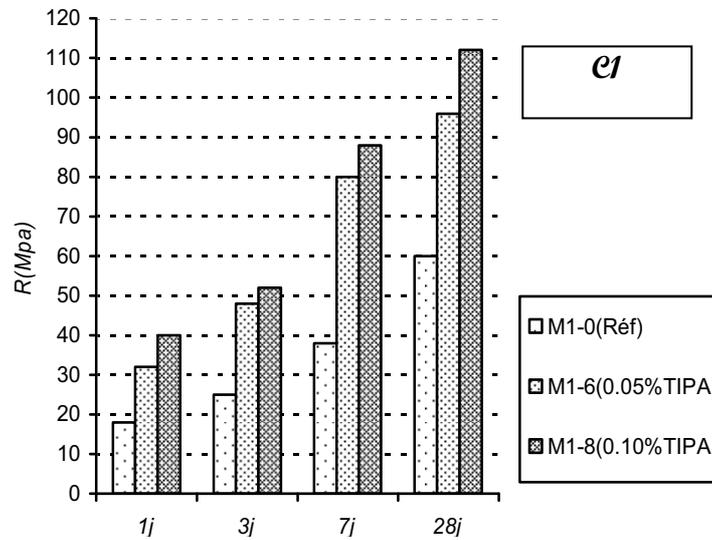


Figure 5.38 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélange M1-6 & M1-8

L'introduction de 0.05% TIPA (M1-6) dans le mélange de pâte pure à base de C1 conduit à l'augmentation de la résistance à la compression d'environ 80% à 1jour, 90% à 3jours, 110% à 7jours et 60% à 28 jours par rapport aux résistances obtenues avec le mélange de référence M1-0.

Une teneur double de 0.10% en TIPA (M1-8) fait augmenter encore un peu plus la résistance en compression pour atteindre des améliorations d'environ 120% à 1jour, 110% à 3 jours, 130% à 7 jours et de 85% à 28 jours toujours en comparaison avec les résistances du mélange de base M1-0.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

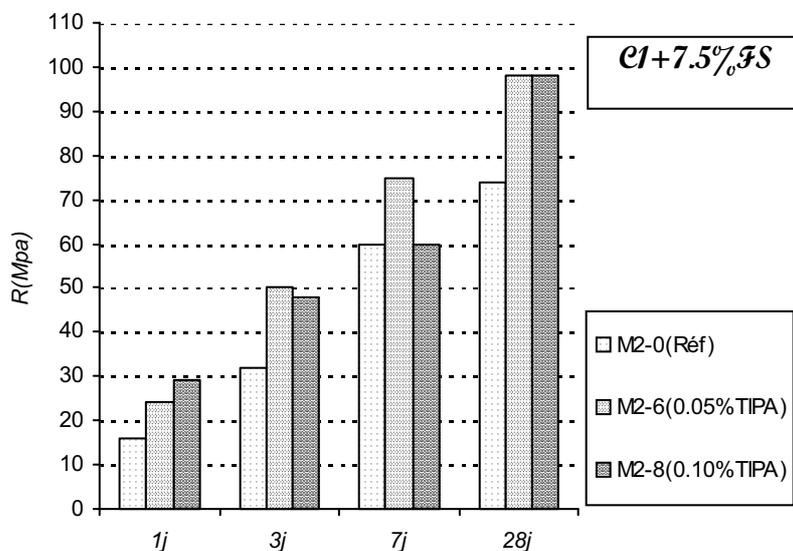


Figure 5.39 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélange M2-6 & M2-8

Pour les mélanges avec 7,5% de FS, l'introduction d'une teneur de 0.05% TIPA (M2-6) fait accroître la résistance en compression d'environ 50% à 1jour, 55% à 3jours, 25% à 7jours et 30% à 28jours par rapport à celles du mélange M2-0.

L'introduction d'une teneur double en TIPA (M2-8) fait augmenter la résistance en compression d'environ 80% à 1jour, 50% à 3 jours, 30% à 28 jours par rapport aux résistances du mélange M2-0 et n'a pas d'influence sur celle à 7 jours.

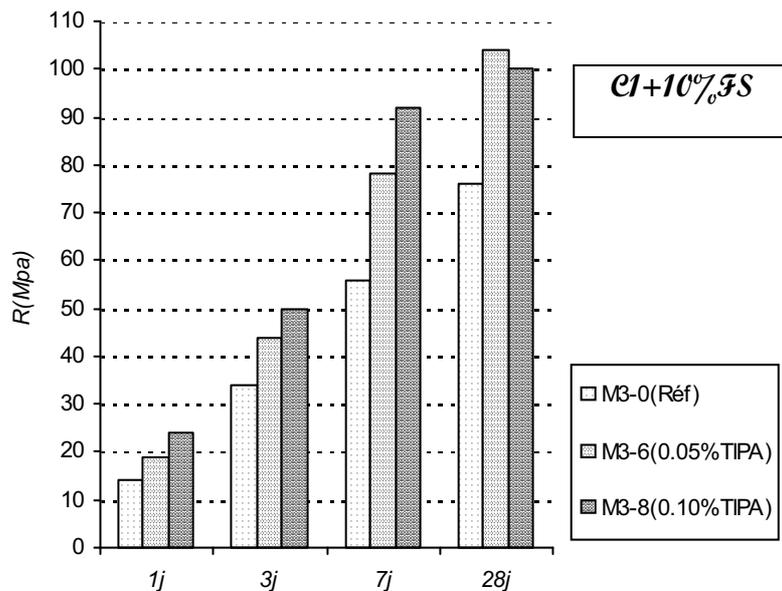


Figure 5.40 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M3-6 & M3-8

L'addition d'une quantité de 0.05% TIPA dans les mélanges avec 10% de FS (M3-6) conduit à une augmentation de la résistance en compression d'environ 35% à 1jour, 30% à 3jours, 40% à 7jours et 35% à 28 jours par rapport à M3-0.

L'introduction d'une teneur double en TIPA (M3-8) fait augmenter considérablement la résistance en compression pour atteindre des améliorations d'environ 70% à 1jour, 50% à 3 jours, 65% à 7 jours et de 30% à 28 jours par rapport aux valeurs obtenues avec le mélange de référence M3-0.

c- Mélanges C1- sable HS

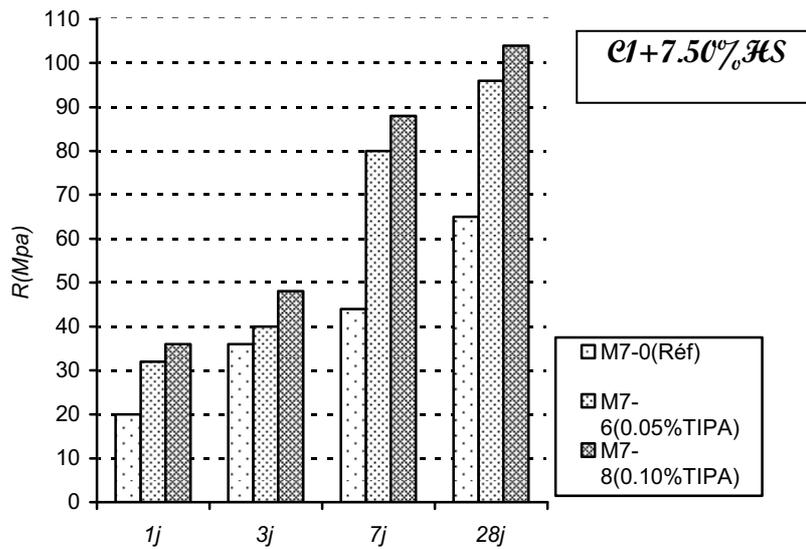


Figure 5.41: Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélanges M7-6 & M7-8

Le dosage de 0.05% TIPA injecté aux mélanges ayant 7,5% de sable HS (M7-6) conduit à une augmentation de la résistance en compression d'environ 60% à 1jour, 10% à 3jours, 80% à 7jours et 50% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues avec le mélange de référence M7-0.

Un dosage double en TIPA (M7-8) fait augmenter la résistance respectivement d'environ 80% à 1jour, 30% à 3 jours, 100% à 7 jours et de 60% à 28 jours.

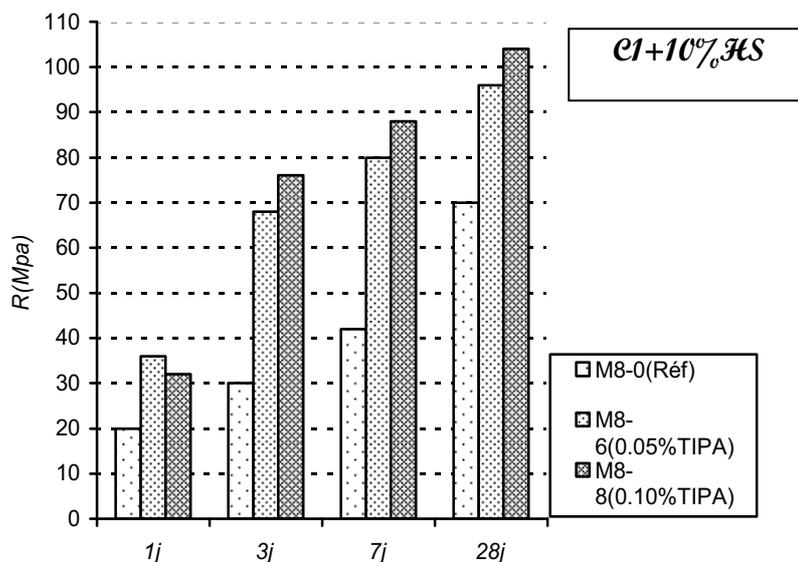


Figure 5.42 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélanges M8-6 & M8-8

L'ajout d'un taux de 0.05% en TIPA dans le cas des mélanges avec 10% de sable HS (M8-6) conduit à une augmentation de la résistance mécanique en compression d'environ 80% à 1jour, 125%

à 3 jours, 90 % à 7 jours et 35 % à 28 jours par comparaison aux résistances du mélange de référence M8-0.

Introduire un taux double en TIPA (M8-8) a fait augmenter la résistance en compression d'environ 60% à 1jour, 150% à 3 jours, 110% à 7 jours et de 50% à 28 jours.

d- Mélanges C1- sable SS

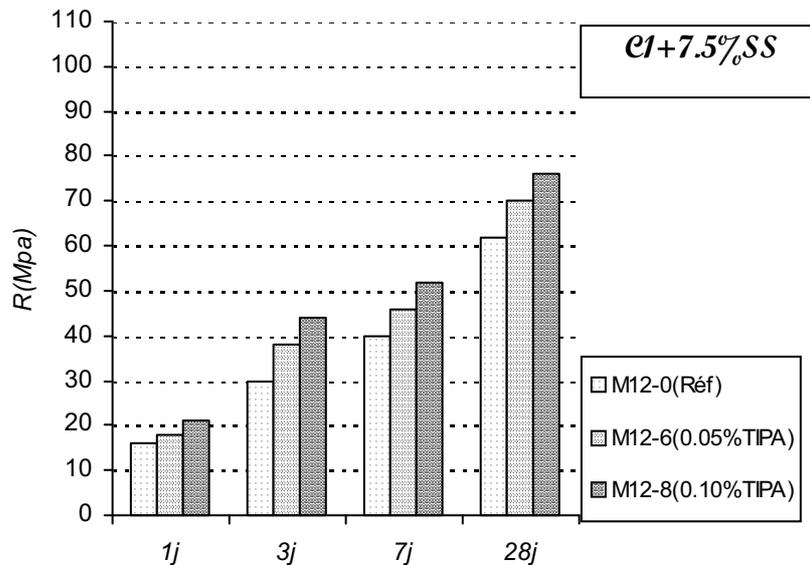


Figure 5.43 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M12-6 & M12-8

Pour les mélanges ayant 7,5% de sable SS, l'introduction de 0.05% TIPA (M12-6) conduit à augmenter la résistance en compression d'environ 10% à 1jour, 25% à 3jours, 15% à 7jours et 10% a 28 jours par rapport aux valeurs du mélange de référence M12-0.

En doublant le taux de TIPA (M12-8), on conduit à une augmentation de la résistance en compression d'environ 30% à 1jour, 45% à 3 jours, 30% à 7 jours et de 20% à 28 jours par rapport à M12-0.

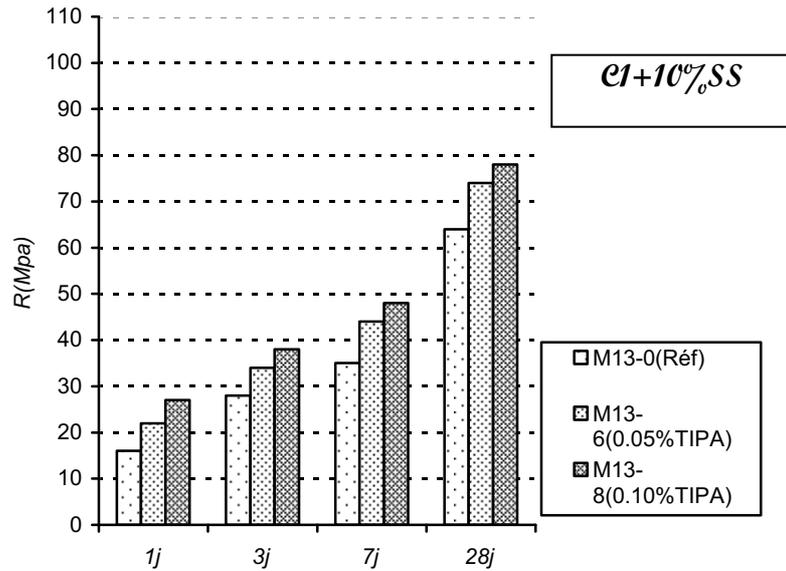


Figure 5.44 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M13-6 & M13-8

Dans le cas des mélanges avec 10% de sable SS l'ajout de 0.05% TIPA (M13-6) fait augmenter les résistances mécaniques d'environ 40% à 1jour, 20% à 3jours, 25% à 7jours et 15% à 28 jours en comparaison avec celles obtenues avec le mélange de référence M13-0.

Passer à un taux double en TIPA (M13-8) les fait augmenter les résistances de 70% à 1jour, 35% à 3 et à 7 jours et de 20% à 28 jours par rapport aux valeurs de M13-0.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges							
		C1*	C1-1*	C1-2*	C1-3*	C1-4*	C1-5*	C1-6*	
		(M1)	(M2)	(M3)	(M7)	(M8)	(M12)	(M13)	
		(100%C1)	(C1-7.5%FS)	(C1-10%FS)	(C1-7.5%HS)	(C1-10%HS)	(C1-7.5%SS)	(C1-10%SS)	
R1j (Mpa)	Réf	18	16	14	20	20	16	16	
	0.05%TIPA	32	24	19	32	36	18	22	
	% / Réf	1.78	1.50	1.36	1.60	1.80	1.13	1.38	
	0.10%TIPA	40	29	24	36	32	21	27	
	% / Réf	2.22	1.81	1.71	1.80	1.60	1.31	1.69	
	R3j (Mpa)	Réf	25	32	34	36	30	30	28
	0.05%TIPA	48	50	44	40	68	38	34	
	% / Réf	1.92	1.56	1.29	1.11	2.27	1.27	1.21	
	0.10%TIPA	52	48	50	48	76	44	38	
	% / Réf	2.08	1.50	1.47	1.33	2.53	1.47	1.36	
	R7j (Mpa)	Réf	38	60	56	44	42	40	35
		0.05%TIPA	80	75	78	80	80	46	44
% / Réf		2.10	1.25	1.39	1.82	1.90	1.15	1.26	
0.10%TIPA		88	60	92	88	88	52	48	
	% / Réf	2.32	1.00	1.64	2.00	2.10	1.30	1.37	
	R28j (Mpa)	Réf	60	74	76	65	70	62	64
		0.05%TIPA	96	98	104	96	96	70	74
% / Réf		1.60	1.32	1.37	1.48	1.37	1.13	1.16	
0.10%TIPA		112	98	100	104	104	76	78	
% / Réf		1.86	1.32	1.32	1.60	1.49	1.23	1.22	

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.6 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de TIPA

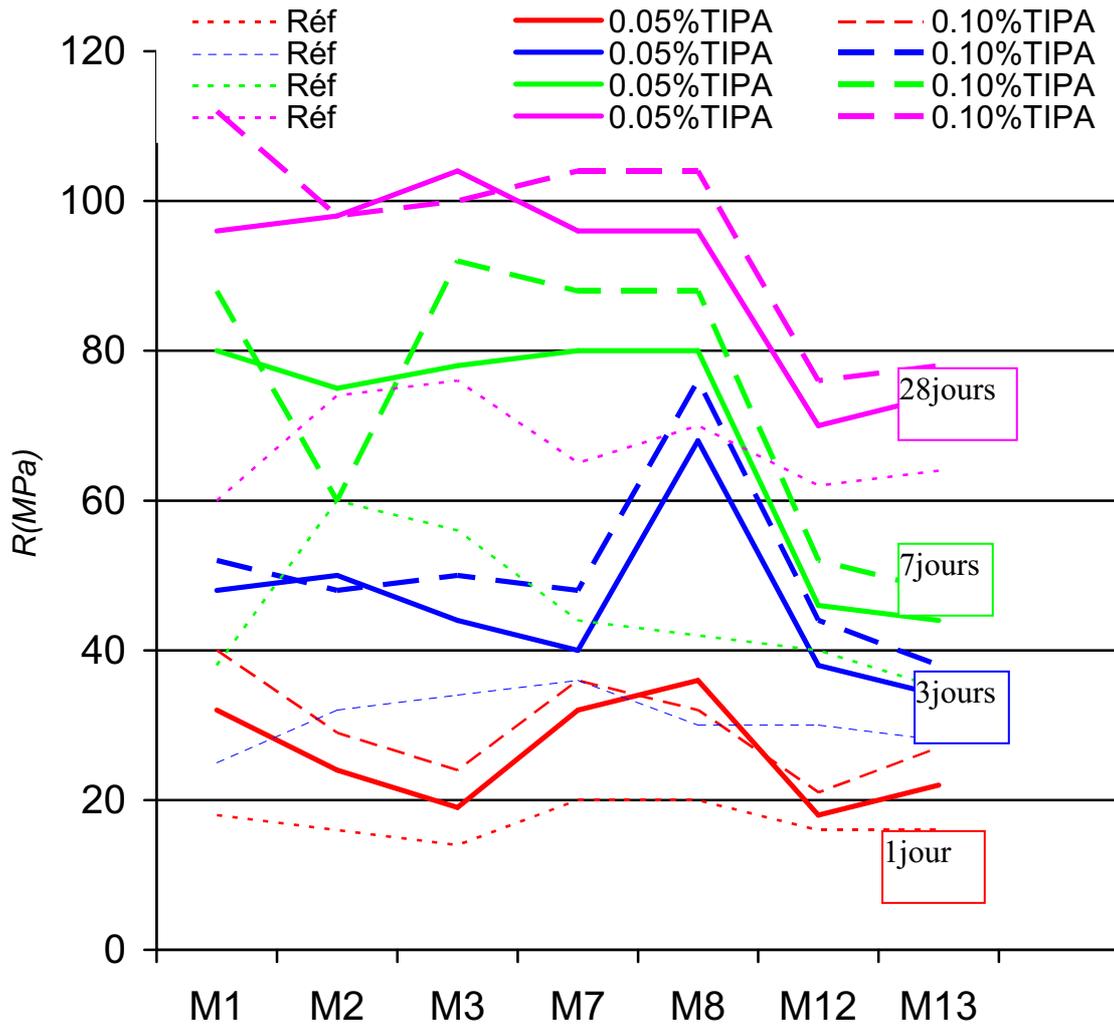


Figure 5.45 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de TIPA

On remarque que la triisopropanolamine permet d'améliorer remarquablement les résistances mécaniques en compression de la pâte pure de ciment C1 (mélanges M1) [57] et des mélanges à 10% de sable HS (mélanges M8) et ceci à toutes les échéances. Elle conduit également à l'amélioration des résistances mécaniques des autres mélanges siliceux mais son action est plus modérée.

Elle contribue donc à améliorer la résistance d'environ 70 à 130% pour la pâte pure et d'environ 50 à 150% pour le mélange M8, son action sur les mélanges avec fumée de silice donne un accroissement de résistance variant en moyenne entre 25 et 80%.

Le fait de doubler le dosage en TIPA engendre un accroissement de la résistance de l'ordre de :

- 10 à 40% entre 1 et 3 jours et 20% entre 7 et 28 pour la pâte pure,
- 20% entre 1 et 3 et 10 à 20% entre 7 et 28 jours pour les mélanges avec sable siliceux HS.

Influence des alcanolamines comme accélérateurs de durcissement sur les pâtes de ciments

Donc le dosage double en TIPA conduit à augmenter les résistances mécaniques de façon modérée avec des valeurs moyennes d'environ 10 à 20%.

L'effet de TIPA est moins efficace, moins net sur le plan de l'amélioration des résistances que celui de TEA.

L'effet le plus important a lieu sur la pâte pure C1 où nous arrivons à doubler la résistance pour 0.10% TIPA à toutes les échéances [58].

5.2.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2

Nous examinons à présent l'effet de la TIPA sur les temps de début et de fin de prise et sur les résistances mécaniques en compression simple des mélanges à base de ciment C2.

5.2.2.1 TEMPS DE PRISE

a- pâte pure à base de C2

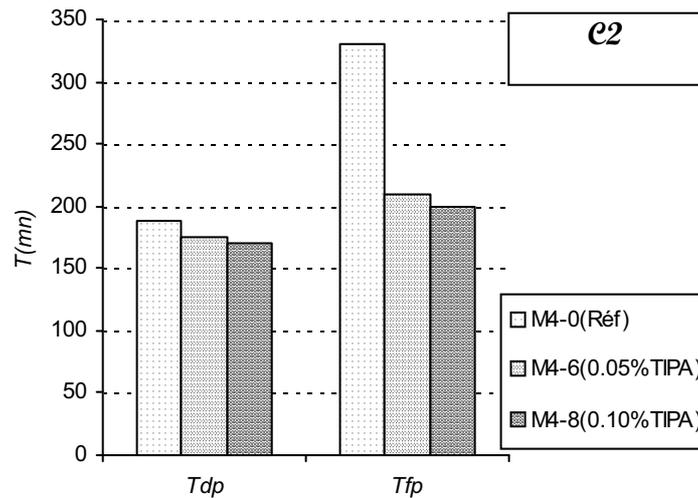


Figure 5.46 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M4-6 & M4-8

Pour la pâte pure de ciment C2, l'introduction d'un dosage de 0.05% en TIPA (M4-6) fait réduire les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 5% et 35% par rapport au mélange de base M4-0.

Une teneur double de TIPA (M4-8) fait diminuer les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 10 et 40% par rapport au mélange de référence et conduit donc à une légère amélioration de la prise comparativement à celle déjà obtenue avec 0,05%.

b- Mélanges C2- fumée de silice (FS)

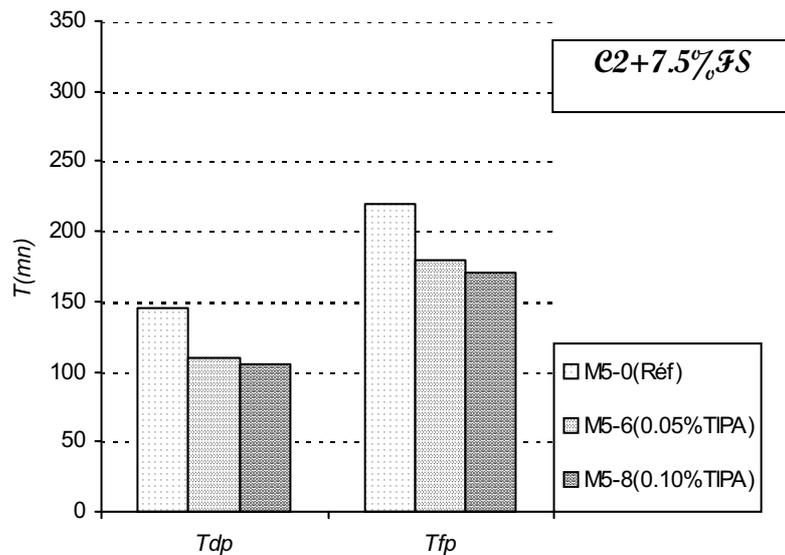


Figure 5.47 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M5-6 & M5-8

Pour les mélanges de 7,5% de FS, l'addition d'une quantité de 0.05% de TIPA (M5-6) fait diminuer les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 25% et 20% par rapport au mélange de base M5-0.

Dans le mélange M5-8 obtenu par l'addition de 0.10% de TIPA, la diminution des temps de début et fin de prise est pratiquement du même ordre que précédemment avec des valeurs d'environ 30% et 20%.

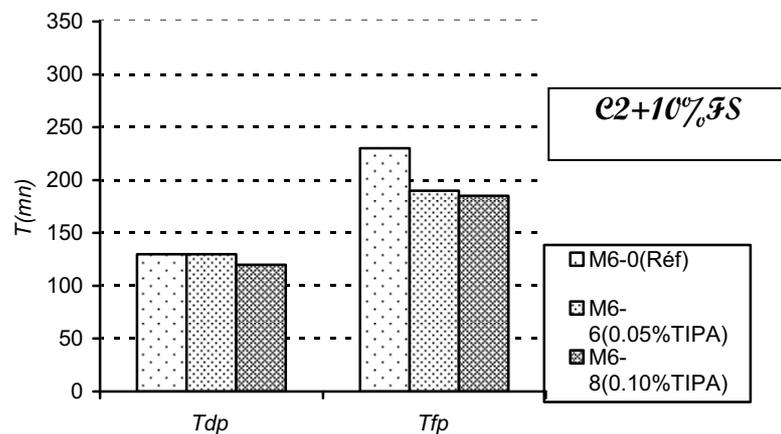


Figure 5.48 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélange M6-6 & M6-8

Dans les mélanges de 10% de FS, l'injection d'une teneur de 0.05% en TIPA (M6-6) conduit à une diminution du temps de fin de prise d'environ 15% et n'a pas d'influence sur le temps de début de prise, en comparaison avec le mélange de base M6-0.

Doubler la teneur en TIPA (M6-8) fait diminuer les temps de début et fin de prise respectivement d'environ 10% et 20% comparativement au mélange M6-0.

c- Mélanges C2- sable HS

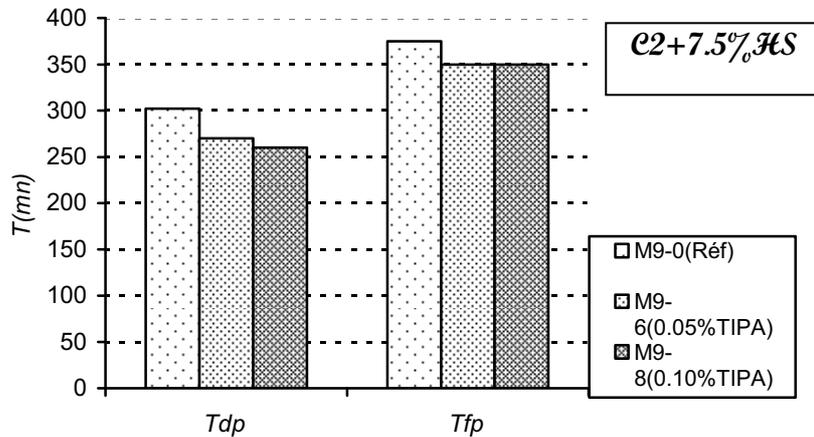


Figure 5.49: Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélange M9-6 & M9-8

Dans le cas des mélanges avec 7,5% de sable HS, l'ajout d'un taux de 0.05% en TIPA (M9-6) fait réduire les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 10% et 5% par rapport au mélange de base M9-0.

Un double taux en TIPA (M9-8) fait diminuer ces temps de début et de fin de prise globalement d'environ 10% par rapport à M9-0.

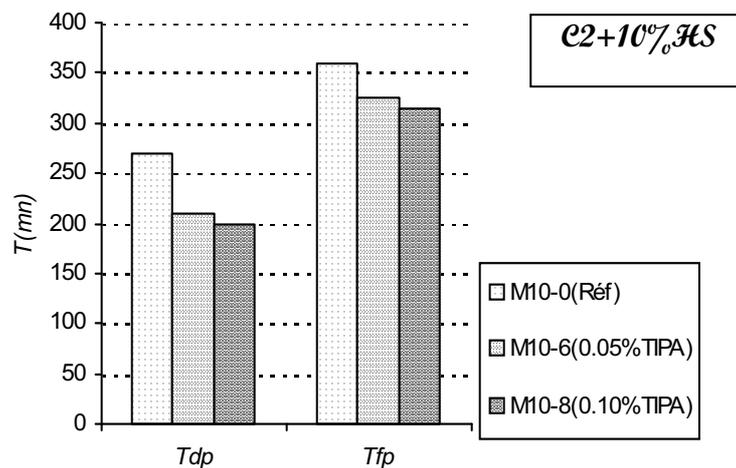


Figure 5.50 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M10-6 & M10-8

Pour les mélanges à 10% de sable HS, l'introduction d'une quantité de 0.05% de TIPA (M10-6) conduit à diminuer les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 20% et 10% par rapport au mélange de base M10-0.

En doublant le ratio en TIPA (M10-8), on fait diminuer les temps de début et fin de prise pratiquement dans les mêmes proportions que précédemment soit environ 25% et 10%.

d- Mélanges C2- sable SS

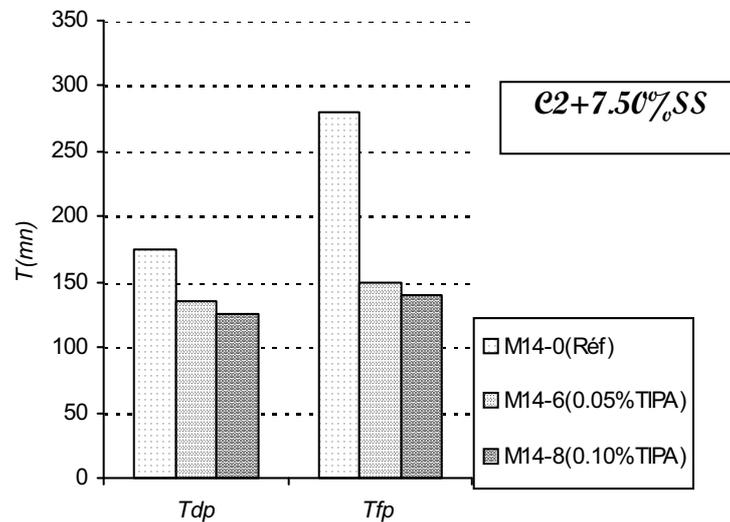


Figure 5.51 : Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M14-6 & M14-8

La figure 5.51 montre que l'ajout d'un ratio de 0.05% en TIPA dans les mélanges de 7,5% de sable SS (M14-6) fait réduire les temps de début et de fin de prise respectivement d'environ 20% et 45% par rapport au mélange de base M14-0.

En augmentant ce ratio à 0.10% (M14-8), on les fait réduire respectivement d'environ 30% et 50% par rapport à M14-0

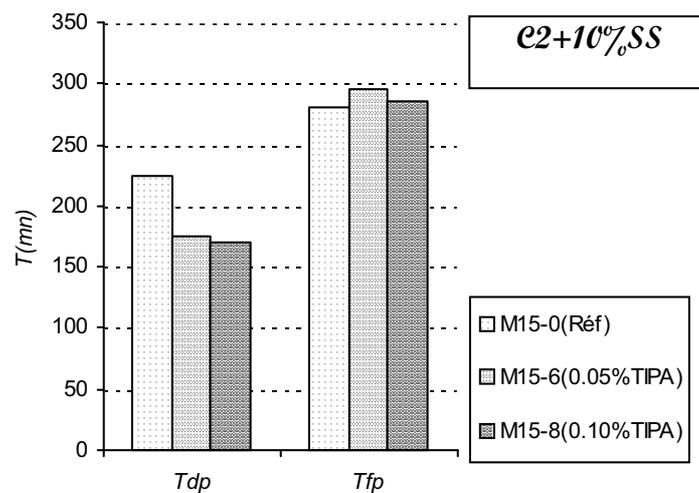


Figure 5.52: Effet du dosage en TIPA sur le temps de prise - Mélanges M15-6 & M15-8

Chapitre 5

Pour les mélanges à 10% de sable SS l'addition de 0.05% en TIPA (M15-6) conduit à une diminution du temps de début de prise d'environ 20% et augmente le temps de fin de prise d'environ 5% par rapport au mélange de base M15-0.

Une teneur double en TIPA (M15-8) conduit sensiblement à un effet similaire que celui obtenu avec 0,05% de TIPA.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2* (M4) (100%C2)	C2-1* (M5) (C2-7.5%FS)	C2-2* (M6) (C2-10%FS)	C2-3* (M9) (C2-7.5%HS)	C2-4* (M10) (C2-10%HS)	C2-5* (M14) (C2-7.5%SS)	C2-6* (M15) (C2-10%SS)
TDP (min)	Réf	188	145	130	302	270	175	225
	0.05%TIPA	175	110	130	270	210	135	175
	% / Réf	93	76	100	89	78	77	78
	0.10%TIPA	170	105	120	260	200	125	170
	% / Réf	90	72	92	86	74	71	76
TFP (min)	Réf	330	220	230	375	360	280	280
	0.05%TIPA	210	180	190	350	325	150	295
	% / Réf	64	82	83	93	90	54	105
	0.10%TIPA	200	170	185	350	315	140	285
	% / Réf	61	77	80	93	88	50	102

* voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.7 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de TIPA

5.2.2.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C2

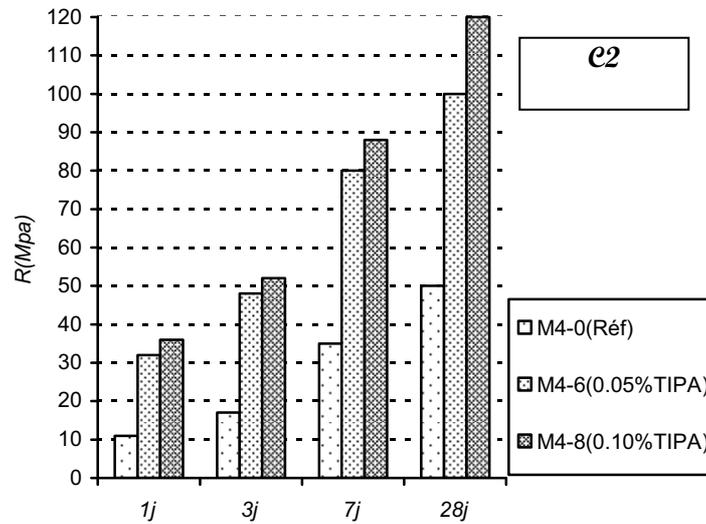


Figure 5.53 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M4-6 & M4-8

D'après la figure 5.53 on remarque que l'introduction de 0.05% TIPA dans les mélanges de pâte pure C2 (M4-6) fait augmenter la résistance mécanique en compression d'environ 190% à 1jour, 180% à 3jours, 130% à 7jours et 100% à 28 jours comparativement à celles du mélange de référence M4-0. L'injection d'une teneur double de TIPA (M4-8) conduit à un accroissement plus important de la résistance mécanique qui atteint environ 225% à 1jour, 205% à 3 jours, 150% à 7 jours et de 140% à 28 jours par comparaison aux résistances obtenues avec le mélange de référence M4-0.

b – Mélanges C2 – fumée de silice (FS)

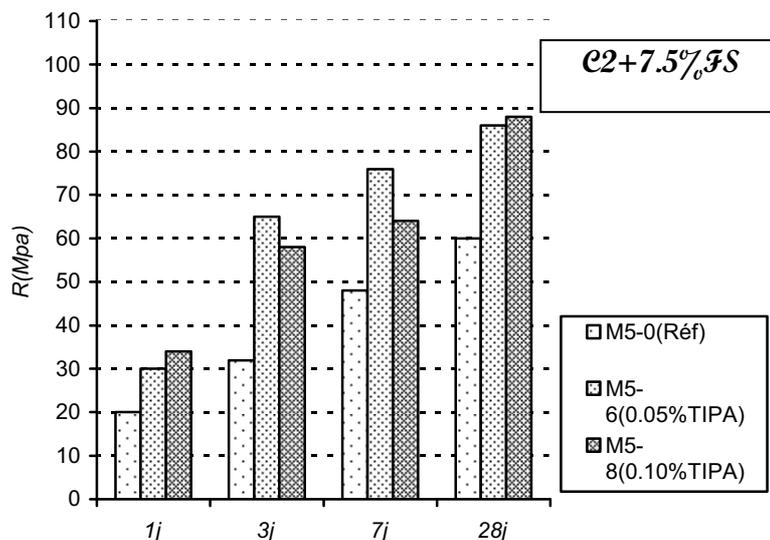


Figure 5.54 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances - Mélanges M5-6 & M5-8

Pour les mélanges à 7,5% de FS, le dosage de 0.05% en TIPA (M5-6) conduit à l'augmentation de la résistance en compression d'environ 50% à 1jour, 100% à 3jours, 60% à 7jours et 40% a 28 jours par rapport à celles du mélange de référence M5-0.

L'utilisation d'un dosage de 0.10% en TIPA (M5-8) fait augmenter la résistance respectivement d'environ 70% à 1jour, 80% à 3 jours, 30% à 7 jours et de 45% à 28 jours comparativement à celles données par le mélange de référence.

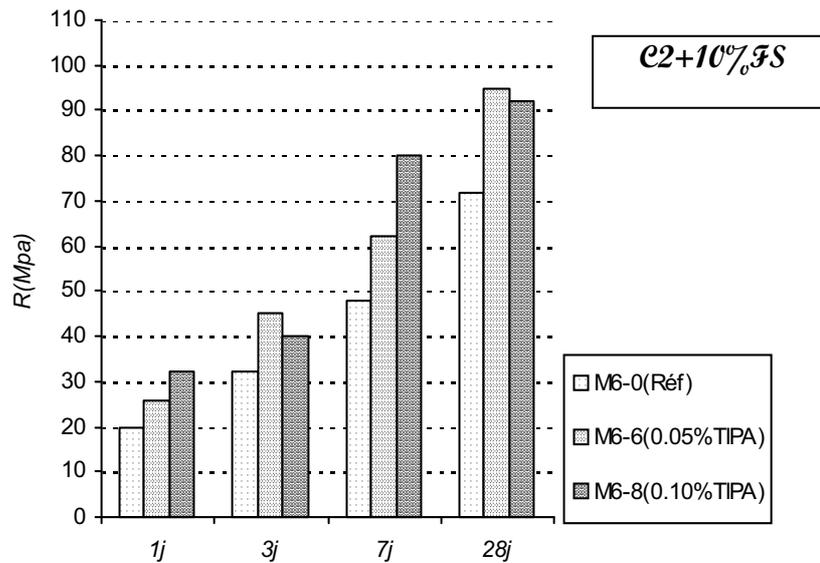


Figure 5.55 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M6-6 & M6-8

L'addition d'une quantité de 0.05% de TIPA dans le mélange avec 10%de FS (M6-6) conduit à l'augmentation de la résistance mécanique d'environ 30% à 1jour, 40% à 3jours, 30% à 7 et 28 jours comparées à celles obtenues sur le mélange de référence(M6-0).

L'utilisation d'une quantité double en TIPA (M8-8) fait augmenter la résistance d'environ 60% à 1jour, 25% à 3 jours, 65% à 7 jours et de 30% à 28 jours par rapport aux valeurs de M6-0.

c - Mélanges C2 – sable HS

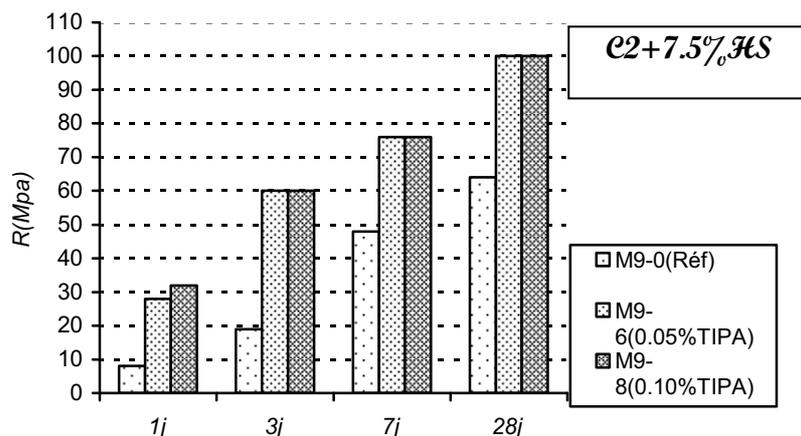


Figure 5.56 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M9-6 & M9-8

A partir de la figure 5.56, on s'aperçoit qu'une teneur de 0.05% en TIPA dans un mélange à 7,5% de sable HS (M9-6) engendre une augmentation de la résistance d'environ 250% à 1jour, 215% à 3jours, 60% à 7jours et 55% à 28 jours par rapport aux valeurs du mélange de référence M9-0.

Un ratio double de 0.10% de TIPA fait augmenter considérablement la résistance mécanique. Cette dernière est améliorée d'environ 300% à 1jour, 215% à 3 jours, 60% à 7 jours et de 55% à 28 jours par rapport à celles obtenues avec M9-0.

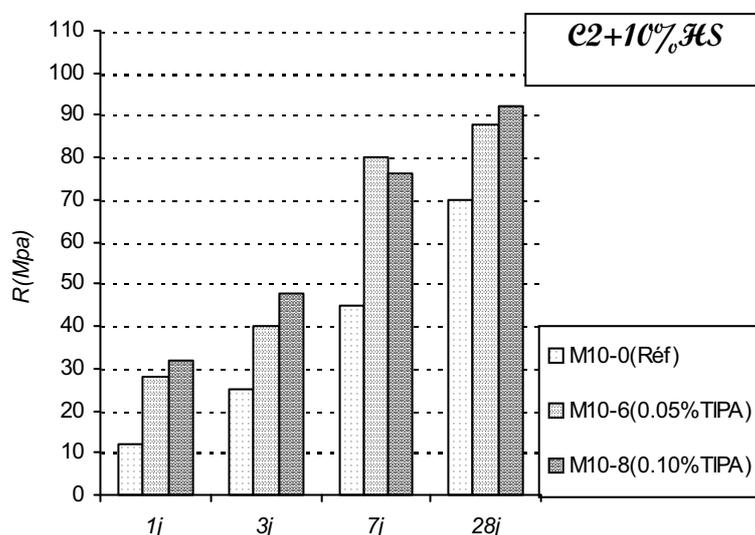


Figure 5.57 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M10-6 & M10-8

Dans le cas de mélanges avec 10% de sable HS, une teneur de 0.05% en TIPA (M10-6) engendre une augmentation de la résistance mécanique d'environ 130% à 1jour, 60% à 3jours, 80% à 7jours et 25% à 28 jours par rapport au mélange de référence.

En doublant cette teneur de TIPA (M10-8), on fait augmenter la résistance mécanique de 165% à 1jour, 90% à 3 jours, 70% à 7 jours et de 30% à 28 jours par rapport à celles de M10-0.

d - Mélanges C2 – sable SS

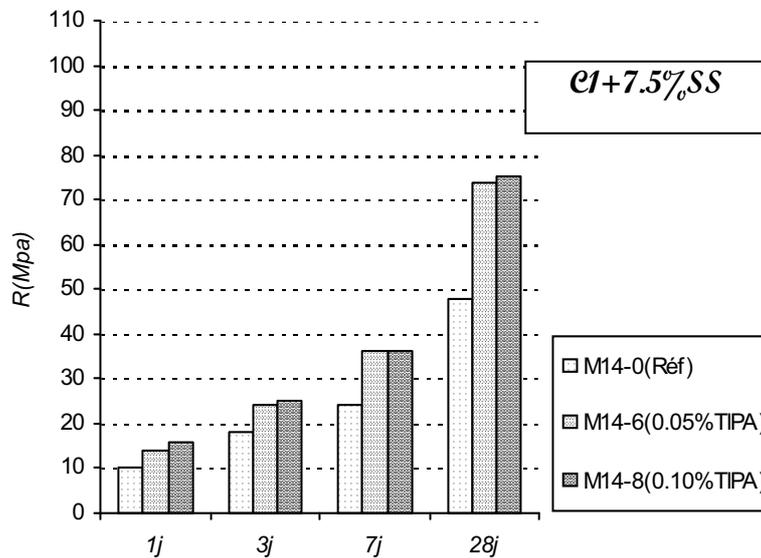


Figure 5.58 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M14-6 & M14-8

En prenant maintenant des mélanges de 7,5% de sable SS, l'introduction d'un taux de 0.05% de TIPA (M14-6) conduit à l'augmentation de la résistance mécanique d'environ 40% à 1jour, 30% à 3jours, 50% à 7jours et 55% a 28 jours par rapport à celles du mélange de référence.

En doublant ce ratio de TIPA (M14-8) on fait augmenter la résistance respectivement d'environ 60% à 1jour, 40% à 3 jours, 50% à 7 jours et de 55% à 28 jours par rapport à celle de M14-0.

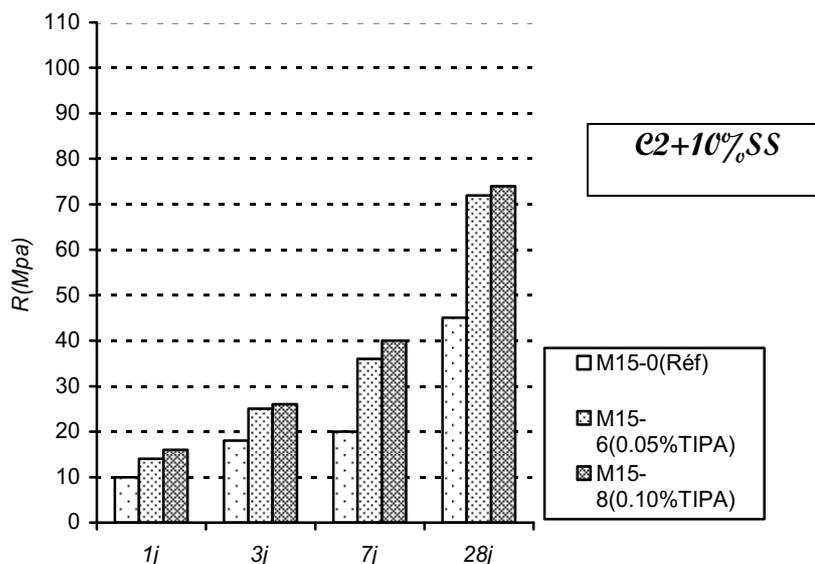


Figure 5.59 : Effet du dosage en TIPA sur le développement des résistances -Mélanges M15-6 & M15-8

Influence des alcanolamines comme accélérateurs de durcissement sur les pâtes de ciments

Pour les mélanges à 10% de sable SS, 0.05% de TIPA (M15-6) fait augmenter la résistance mécanique d'environ 40% à 1 et 3 jours, 80% à 7 jours et 60% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues sur M15-0. Une teneur double de TIPA (M15-8) engendre une augmentation de la résistance mécanique d'environ 60% à 1 jour, 45% à 3 jours, 100% à 7 jours et de 65% à 28 jours par rapport aux valeurs de M15-0.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2* (M4) <small>(100%C2)</small>	C2-1* (M5) <small>(C2-7.5%FS)</small>	C2-2* (M6) <small>(C2-10%FS)</small>	C2-3* (M9) <small>(C2-7.5%HS)</small>	C2-4* (M10) <small>(C2-10%HS)</small>	C2-5* (M14) <small>(C2-7.5%SS)</small>	C2-6* (M15) <small>(C2-10%SS)</small>
R1j (Mpa)	Réf	11	20	20	8	12	10	10
	0.05%TIPA	32	30	26	28	28	14	14
	% / Réf	2.91	1.50	1.30	3.50	2.33	1.40	1.40
	0.10%TIPA	36	34	32	32	32	16	16
	% / Réf	3.27	1.70	1.60	4.00	2.67	1.60	1.60
R3j (Mpa)	Réf	17	32	32	19	25	18	18
	0.05%TIPA	48	65	45	60	40	24	25
	% / Réf	2.82	2.03	1.41	3.16	1.60	1.33	1.39
	0.10%TIPA	52	58	40	60	48	25	26
	% / Réf	3.06	1.81	1.25	3.16	1.92	1.39	1.44
R7j (Mpa)	Réf	35	48	48	48	45	24	20
	0.05%TIPA	80	76	62	76	80	36	36
	% / Réf	2.29	1.58	1.29	1.58	1.78	1.50	1.80
	0.10%TIPA	88	64	80	76	76	36	40
	% / Réf	2.51	1.33	1.67	1.58	1.69	1.50	2.00
R28j (Mpa)	Réf	50	60	72	64	70	48	45
	0.05%TIPA	100	86	95	100	88	74	72
	% / Réf	2.00	1.43	1.32	1.56	1.26	1.54	1.60
	0.10%TIPA	120	88	92	100	92	75	74
	% / Réf	2.40	1.47	1.28	1.56	1.31	1.56	1.64

** voir la définition des mélanges § chap.II

Tableau 5.8 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TIPA

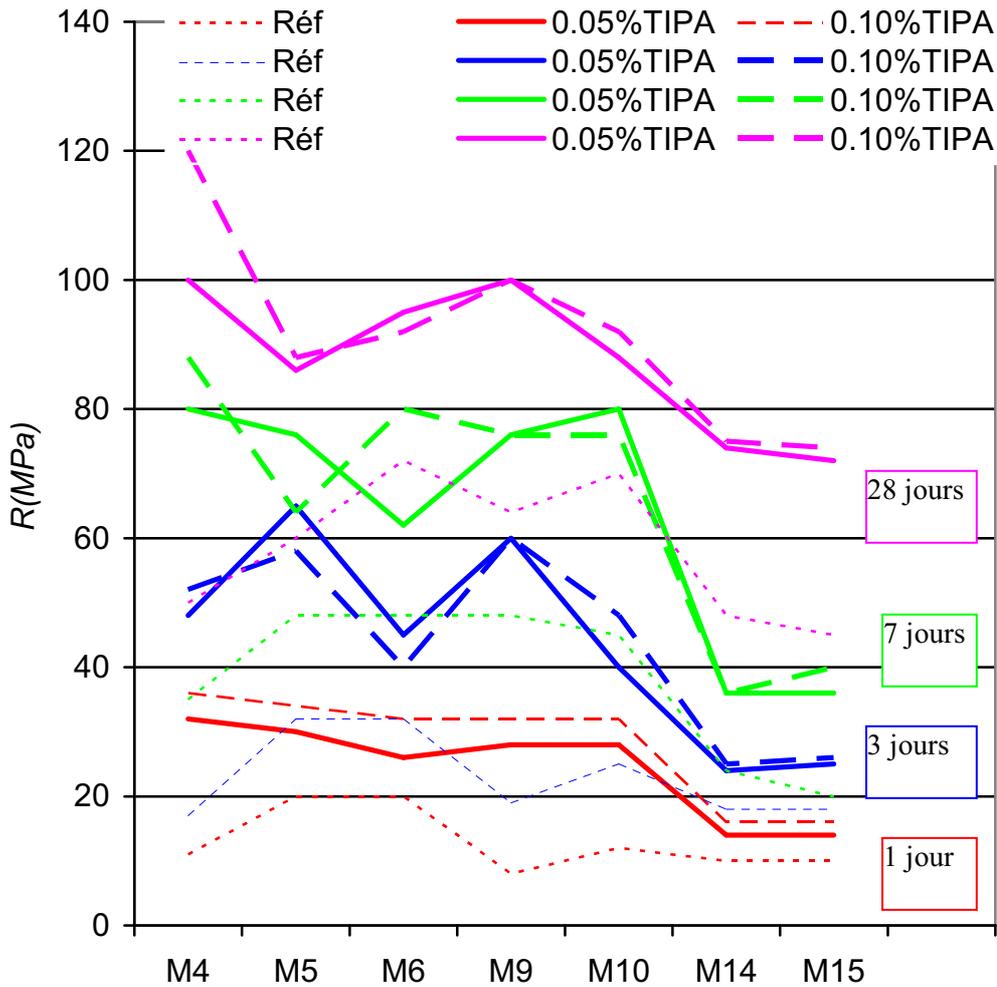


Figure 5.60 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de TIPA

D'après le tableau 5.8 et la figure 5.60 on s'aperçoit que la triisopropanolamine est plus efficace avec le mélange de pâte pure à base de ciment C2 et les mélanges ayant du sable siliceux HS. Son efficacité est plus modérée avec les autres mélanges avec additions siliceuses.

Elle conduit donc à l'augmentation des résistances mécaniques pour la pâte pure d'environ 190 à 220% à 1 jour, 180 à 200% à 3 jours, 120 à 150% à 7 jours et 100 à 140% à 28 jours. Pour les mélanges avec 7.5% de HS (M9) cette amélioration est d'environ 250 à 300% à 1 jour, 210% à 3 jours, 55% à 7 et 28 jours. Avec 10% de fumée de silice (M6) les résultats sont plus modérés et varient en moyenne entre 10 et 25%. Les mélanges avec sable siliceux SS donnent des résultats intéressants aussi et se traduisent par une amélioration de la résistance d'environ 40 à 60% à 1 jour, 30 à 40% à 3 jours, 50 à 80% à 7 jours et 50 à 60% à 28 jours.

Chapitre 5

Le fait de passer à un dosage double de triisopropanolamine (0.10%) fait croître la résistance mécanique d'une façon très modérée pour tous les mélanges étudiés et à toutes les échéances.

Un dosage de 0.05% TIPA suffit et convient mieux pour l'amélioration des résistances et il n'est pas nécessaire de passer un dosage double (0.10%) car la variation est insignifiante comparée à celle produite par l'introduction d'un dosage double en TEA.

Les mélanges les plus performants restent la pâte pure et les mélanges avec sable siliceux HS et fumée de silice au dosage de 7.5%.

5.3 Conclusion

Le nitrate de calcium est un adjuvant qui joue un rôle d'accélérateur de prise et n'apporte pas semble-t-il d'amélioration de la résistance du béton à long terme.

Afin d'augmenter cette résistance, l'ajout d'autres composés de la famille des alcanolamines a été envisagé.

La triéthanolamine utilisée avec des dosages de 0.05% et 0.10% ralentit dans les premières heures, la vitesse d'hydratation des ciments de base C1 et C2 mais contribue rapidement par la suite à une amélioration de la résistance en compression pour les deux ciments [56]. De plus pour le ciment C2 riche en C_4AF elle réduit le temps de fin de prise de près de 75% pour le dosage de 0.05% et de 70% pour celui de 0.10%. Par contre, la triéthanolamine pour les mélanges avec additions siliceuses et à base de ciment C1 améliore le temps de début et fin de prise.

La triéthanolamine est plus efficace sur le mélange C1-7.5%SS (M12) pour le quel elle réduit le temps de début et fin de prise respectivement de 50% et 26% pour un dosage de 0.05%. Le passage à un dosage double de triéthanolamine n'apporte pas beaucoup d'amélioration sur le temps de début et fin de prise du mélange M12.

Du point de vue de la résistance mécanique la triéthanolamine est plus efficace sur le ciment de base C1 (M1) à court et long terme pour la teneur de 0.05% et 0.10% comparativement aux autres mélanges avec additions siliceuses et à base de ciment C1.

Pour le ciment C2, elle est plus efficace au dosage de 0.05% pour les mélanges C2-7.5%HS (M9) à court terme et le mélange C2-7.5%SS (M14) au delà de 28j d'âge. Elle augmente la résistance du mélange M9 d'environ 60% à 1j, 15% à 3j et 10% à 28j pour la teneur de 0.05% et multiplie la résistance par quatre à un jour, conduit à une augmentation d'environ 130% à 3j, 15% à 7j et 25% à 28j pour le dosage de 0.10%. Sur le ciment C2 (M4) elle augmente la résistance d'environ 190% à 1j, 220% à 3j, 110% à 7j et d'au moins 100% à 28j pour la teneur de 0.10%.

Ainsi le passage à une teneur double de triéthanolamine améliore remarquablement les valeurs des résistances et qualifie ainsi la triéthanolamine d'accélérateur de durcissement potentiel [56].

L'utilisation respective d'une teneur de 0.05% et 0.10% de triisopropanolamine avec le ciment de base C1 (M1) a un effet mineur sur le temps de début et de fin de prise, par contre son effet sur les résistances à la compression à toutes les échéances est très significatif. 0.05% TIPA augmente la résistance du ciment de base C1 d'environ 80% à 1jour, 90% à 3jours, 110% à 7 jours et 60% à 28 jours. Cette influence est encore visible avec la teneur de 0.10% de triisopropanolamine ou l'augmentation des résistances mécaniques est d'environ 120% à 1jour, 110% à 3jours, 130% à 7jours et 85% à 28jours.

Dans le cas du ciment C2 (M4) riche en C_4AF , l'effet de 0.05% de triisopropanolamine se traduit par une réduction du temps de fin de prise de 40%. Il améliore aussi la résistance à la compression à toutes les échéances par une augmentation d'environ 185% à 1 et 3jours, 130% à 7 jours et 100% à 28 jours. Le dosage de 0.10% de triisopropanolamine conduit à des résultats similaires sur le temps de fin de prise, par contre la résistance à la compression augmente de 220% à 1 et 3jours, 145% à 7 et 28 jours comparativement aux résistances du mélange de base M4 (C2).

Etant donné que la variation de résistance pendant le passage à un dosage double de TIPA n'est pas significative comparée à celle provoquée par le passage à un dosage double en TEA on peut se contenter de l'utilisation du dosage de 0.05% TIPA.

Ces résultats montrent que la triisopropanolamine est un accélérateur de durcissement performant dépendant du type de ciment utilisé. Ils montrent aussi que l'augmentation des résistances mécaniques n'est pas significative en augmentant le dosage en triisopropanolamine de 0.05% à 0.10%, surtout entre 3j et 28j.

Avec l'utilisation de la triisopropanolamine l'efficacité du point de vue résistance apparaît à court et long terme pour les mélanges C1, C1-10%HS (M8), C2 et C2-7.5%HS pour les dosages de 0.05 et 0.10% TIPA.

CHAPITRE 6 ETUDE DES COMBINAISONS D'ADJUVANTS SUR LES PATES DE CIMENT

Dans ce chapitre nous analysons l'effet de la combinaison du nitrate de calcium avec les alcanolamines TEA et TIPA. Nous étudions l'influence de cette combinaison avec les dosages de 0.05% et 0.10% par rapport aux poids des mélanges pour les alcanolamines (TEA et TIPA) et 1% en poids pour le nitrate de calcium (NC) sur le temps de prise et le développement des résistances mécaniques en compression à la température de $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$. Nous comparons les effets de chacune des combinaisons.

6.1 EFFET DU DOSAGE EN TEA COMBINÉ AU NITRATE DE CALCIUM (NC)

6.1.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1

6.1.1.1 TEMPS DE PRISE

a- Pâte pure à base de C1

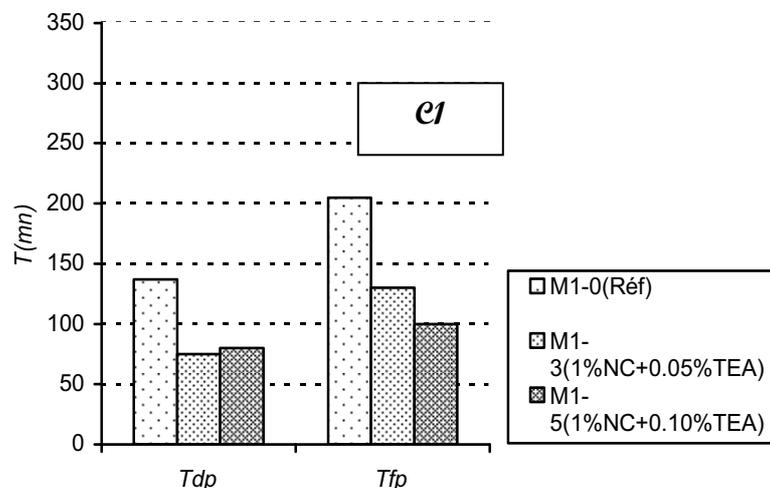


Figure 6.1 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise -Mélanges M1-3 & M1-5

La figure 6.1 montre que l'introduction de 1% de NC avec 0.05% de TEA par rapport au poids du mélange de la pâte pure à base de C1 (M1-3) fait diminuer le temps de début de prise d'environ 45% et le temps de fin de prise de 25% par rapport au mélange de base M1-0. Une combinaison de 1% de NC avec 0.10% TEA (M1-5) contribue à diminuer le temps de début de prise et le temps de fin de prise de 40% comparativement au mélange de référence M1-0.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

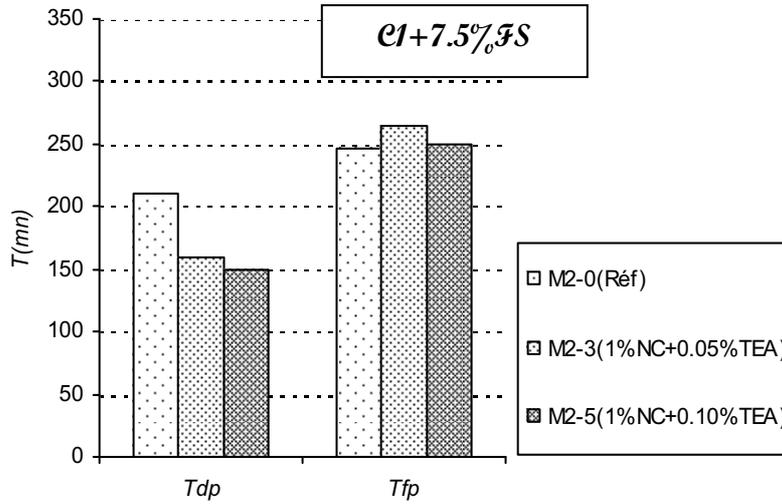


Figure 6.2 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M2-3 & M2-5

En additionnant un couple d'adjuvant composé de 1% NC et de 0.05% ou 0.1% de TEA dans un mélange à base de C1 et de 7.5% de FS (M2-3 et M2-5), le temps de début de prise diminue d'environ 25% à 30% alors que le temps de fin de prise n'est pratiquement pas modifié.

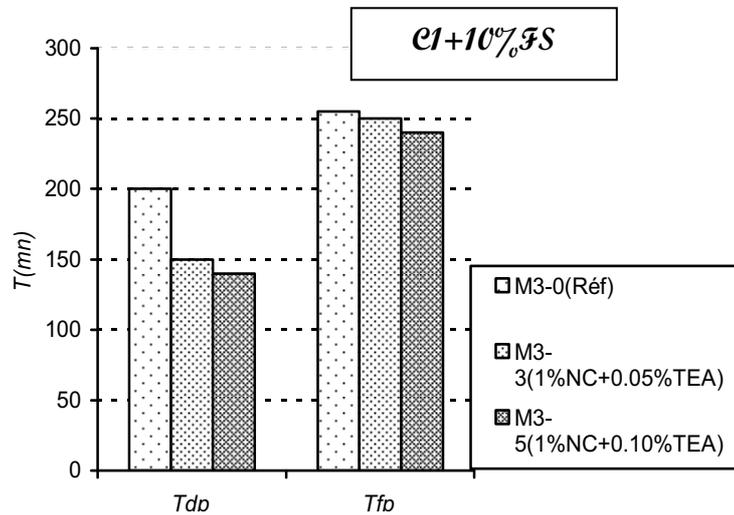


Figure 6.3 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M3-3 & M3-5

La figure 6.3 montre que l'addition d'un même couple d'adjuvant (NC et TEA) aux mêmes dosages que précédemment dans un mélange à base de C1 mais avec 10% de FS (M3-3 et M3-5) conduit au même phénomène déjà observé dans le cas précédent à l'exception

d'une légère amélioration du temps de fin de prise qui reste minime par rapport au mélange de base M3-0.

c- Mélanges C1-HS

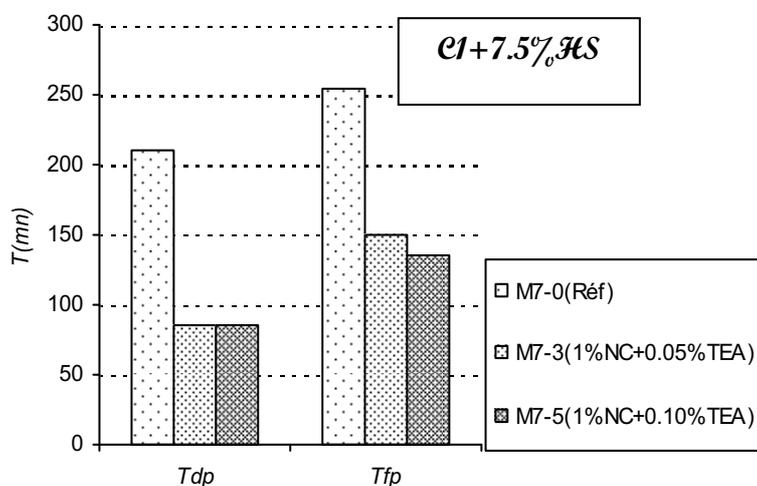


Figure 6.4 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M7-3 & M7-5

Dans le cas d'un mélange à base de C1 et de 7.5% sable siliceux HS, l'addition de 1% NC et TEA quel que soit son dosage (0.05% dans le cas de M7-3 et 0.1% dans le cas de M5-7) entraîne une réduction du temps de début de prise d'environ 60% et du temps de fin de prise de 40% par rapport au mélange de base M7-0.

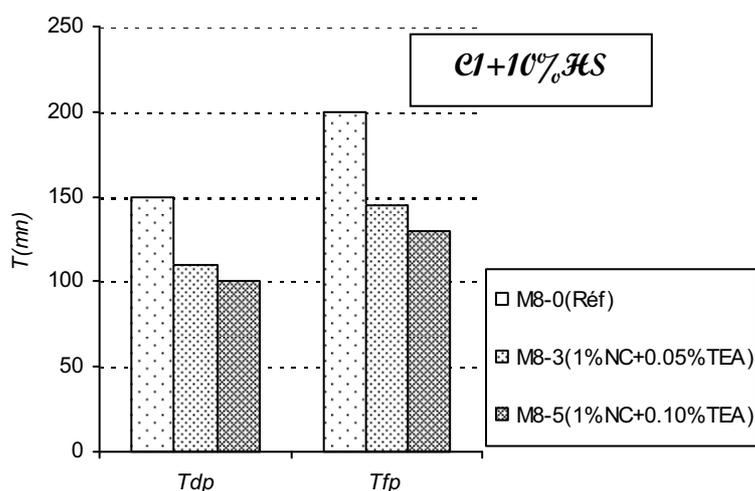


Figure 6.5 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M8-3 & M8-5

Les mêmes combinaison d'adjuvant avec les même dosage que précédemment teneur (1% NC et TEA (0.05% pour le M8-3 et 0.1% pour le M8-5)) rajoutée à un mélange à base de

C1 et de 10% de sable HS conduit à réduire le temps de début et fin de prise de l'ordre de 25% (M8-3) à 35 % (M8-5) par rapport au mélange de référence (M8-0).

d- Mélange C1-SS

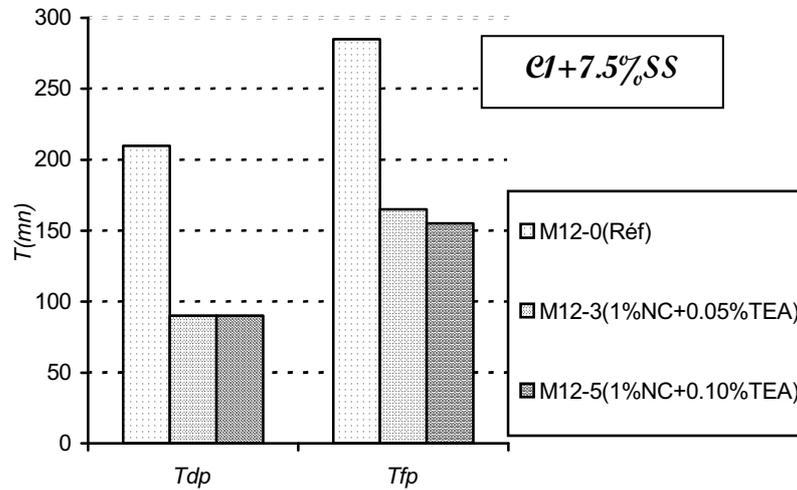


Figure 6.6 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M12-3 1 M12-5

Dans le cas d'un mélange de C1 et de 7.5% de sable SS, une combinaison de 1% NC+0.05% TEA dans le M12-3 et de 1% NC+0.1% TEA dans le M12-5 fait diminuer le temps de début et fin de prise respectivement d'environ 55% et 40% à 45% par rapport au mélange de référence M12-0.

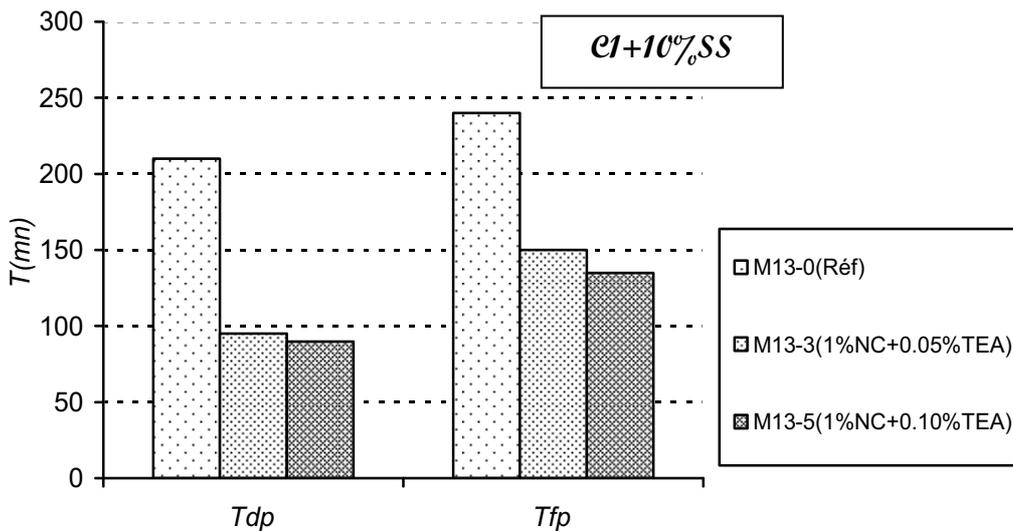


Figure 6.7 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M13-3 & M13-5

Chapitre 6

Dans le cas d' un mélange de C1 et de 10% de sable SS, ces combinaisons (1% NC+0.05% TEA pour le M13-3 et de 1% NC+0.1% TEA pour le M13-5) conduisent à une diminution du temps de début d'environ 55% et du temps de fin de prise de l'ordre de 35% (M13-3) à 45% (M13-5) par rapport au mélange de référence M13-0.

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1 (M1) (100%C1)	C1-1 (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2 (M3) (C1-10%FS)	C1-3 (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4 (M8) (C1-10%HS)	C1-5 (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6 (M13) (C1-10%SS)
TDP (min)	Réf	137	210	200	210	150	210	210
	1%NC+0.05%TEA	75	160	150	85	110	90	95
	% / Réf	55	76	75	40	73	43	45
	1%NC+0.10%TEA	80	150	140	85	100	90	90
	% / Réf	58	71	70	40	67	43	43
TFP (min)	Réf	205	247	255	255	200	285	240
	1%NC+0.05%TEA	130	265	250	150	145	165	150
	% / Réf	63	107	98	59	73	58	63
	1%NC+0.10%TEA	120	250	240	135	130	155	135
	% / Réf	59	101	94	53	65	54	56

Tableau 6.1 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de la combinaison NC+TEA

D'après les résultats obtenus et récapitulés dans le tableau 6.1 nous pouvons faire deux constatations importantes :

1. la combinaison d'adjuvants NC (accélérateur de prise) et de TEA (accélérateur de durcissement) réduit d'une manière très significative les temps de début et de fin de prise notamment dans le cas des mélanges de sable siliceux.
2. l'utilisation du TEA avec un dosage double (0.1%) apporte peu de modification par rapport aux résultats obtenus avec un dosage de 0.05%

6.1.1.2 RESISTANCES MECANIQUES

Nous reprenons les mêmes mélanges dans lesquels nous introduisant les mêmes combinaison d'adjuvants avec les mêmes dosages que ceux étudiés dans le paragraphe précédent pour analyser leurs effets sur l'évolution des résistances mécaniques en compression simple .

a- Pâte pure à base de C1

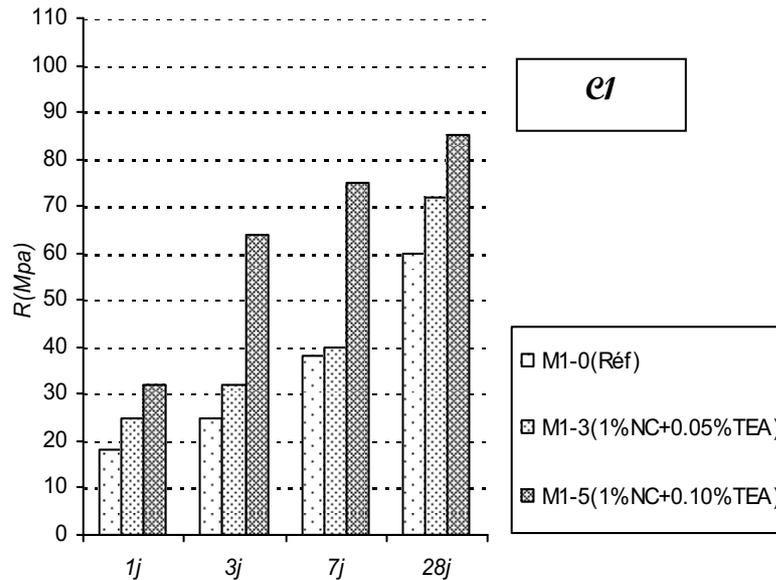


Figure 6.8: Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M1-3 & M1-5

Une combinaison de 1% NC + 0.05% TEA (M1-3) introduite dans le mélange M1-0 de pâte pure de ciment C1 fait augmenter la résistance en compression d'environ 40% à 1jour, 30% à 3jours, 5% à 7jours et 20% à 28 jours. Cependant, doubler le dosage de TEA (0.1%) dans la combinaison précédente (M1-5) fait augmenter considérablement la résistance mécanique de 55% à 1jour, 140% à 3 jours, 90% à 7 jours et de 30% à 28 jours par rapport aux valeurs obtenues pour le mélange de référence M1-0.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

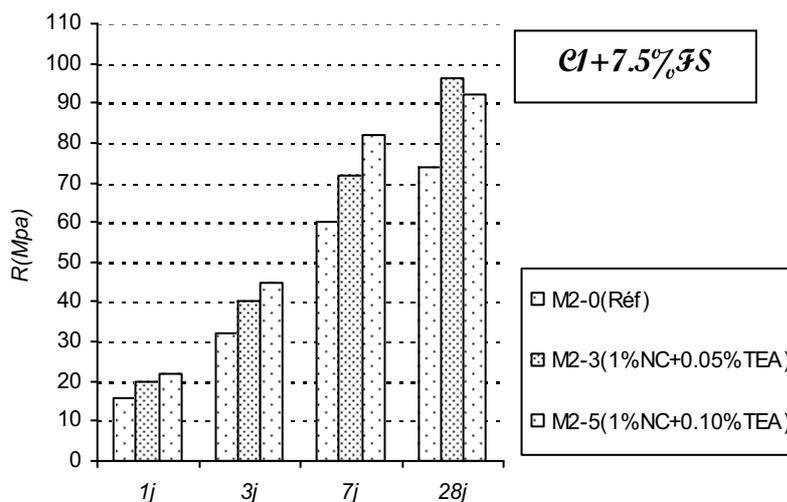


Figure 6.9 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M2-3 & M2-5

Dans les cas des mélanges avec 7.5% de FS, la combinaison d'adjuvant de 1% NC+0.05% TEA (M2-3) conduit à l'augmentation de la résistance en compression d'environ 25% à 1 et 3 jours, 20% à 7 jours et 30% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues sur le mélange de référence M2-0.

Si on passe à 0.1% de TEA avec la combinaison d'adjuvants précédente (M2-5), on améliore la résistance d'environ 40% à 1 et 3 jours, 35% à 7 jours et de 25% à 28 jours par rapport à M2-0.

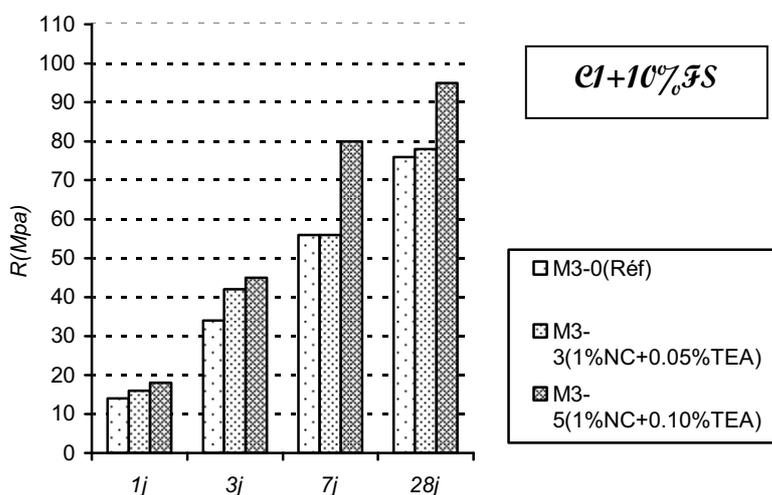


Figure 6.10 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistance - Mélanges M3-3 & M3-5

Quand on utilise des mélanges à 10% de FS avec 1% NC + 0.05% TEA (M3-3) on fait augmenter la résistance en compression d'environ 15% à 1 jour, 25% à 3 jours, et 5% à 28 jours par rapport au mélange de référence.

Si on double la teneur en TEA dans les mélanges précédents (M3-5) on fait augmenter la résistance en compression d'environ 30% à 1 et 3 jours, 40% à 7 jours et de 25% à 28 jours par rapport aux résistances du mélange M3-0.

c- Mélanges C1- sable HS

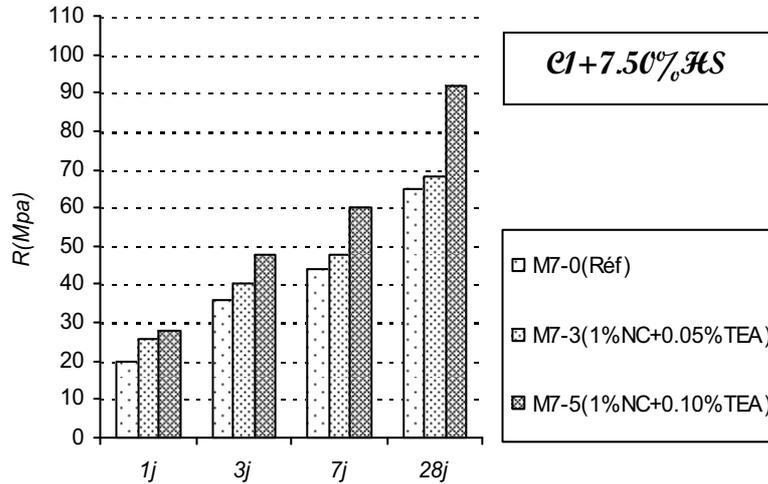


Figure 6.11 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M7-3 & M7-5

Dans les mélanges avec 7.5% de sable HS, l'injection de 1% NC+0.05% TEA (M7-3) fait augmenter la résistance mécanique de 30% à 1 jour, 10% à 3 et 7 jours et 5% à 28 jours par rapport aux valeurs du mélange M7-0.

Si on utilise un mélange de 1%NC+0.10% TEA (M7-3), la résistance est largement augmentée de 40% à 1jour, 30% à 3 jours, 35% à 7 jours et de 40% à 28 jours.

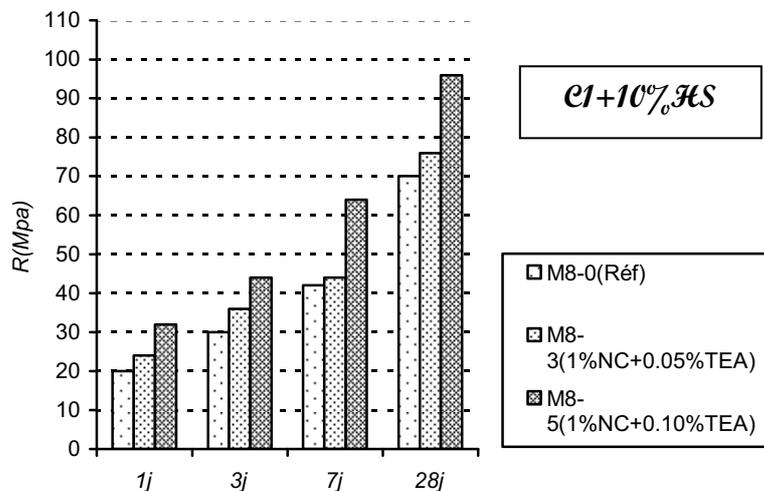


Figure 6.12 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M8-3 & M8-5

Dans les mélanges à 10%de sable HS l'introduction de :

- 1% NC+0.05% TEA (mélange M8-3) conduit à un évolution de la résistance mécanique d'environ 20% à 1 et 3jours, 5% à 7jours et 10% à 28 jours comparativement aux résistances obtenues avec le mélange de base M8-0.
- 1% NC+0.01% TEA (mélange M8-5) conduit à une évolution de la résistance mécanique d'environ 60% à 1jour, 45% à 3 jours, 50% à 7 jours et de 35% à 28 jours par rapport aux résistances obtenues avec M8-0.

Les résultats obtenus en terme d'augmentation des résistances sont comparables pour les mélanges à 7.5 et 10% HS.

d- Mélanges C1- sable SS

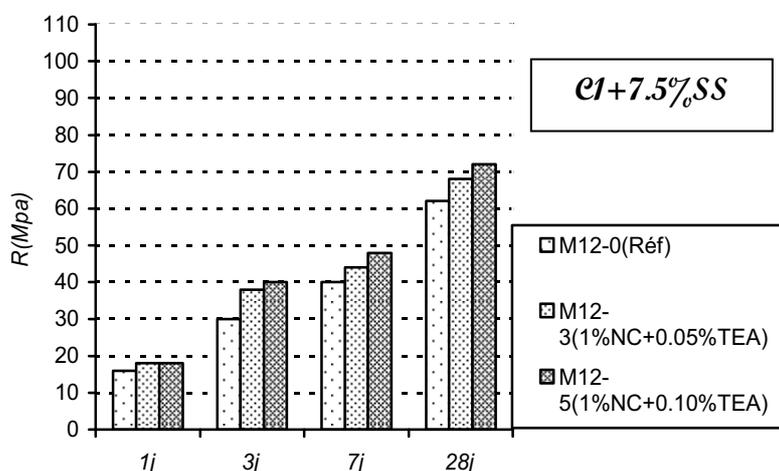


Figure 6.13 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances – Mélanges M12-3 & M12-5

Pour les mélanges à 7.5% de sable SS, l'addition de 1% NC+0.05% TEA (M12-3) ou de 1%NC+0.10% TEA (M12-5) fait augmenter la résistance mécanique d'environ 10% à 1 jour, 25% à 30% à 3 jours, 10% (M12-3) et 20% (M12-5) à 7 jours et 10 à 15% à 28 jours.

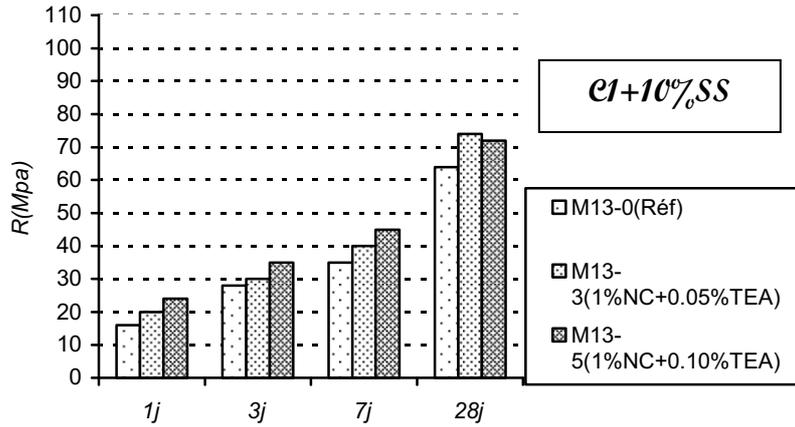


Figure 6.14 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélange M13-3 & M13-5

Quand on passe à des mélanges de 10% de sable SS, l'ajout de 1% NC+0.05% TEA (M13-3) fait améliorer la résistance mécanique d'environ 25% à 1 jour, 5% à 3 jours, 15% à 7 et 28 jours par rapport aux résistances du mélange de base. Alors qu'une combinaison de 1%NC+0.10% TEA (M13-5) fait augmenter la résistance mécanique d'environ 50% à 1jour, 25% à 3 jours, 30% à 7 jours et de 10% à 28 jours.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1 (M1) <small>(100%C1)</small>	C1-1 (M2) <small>(C1-7.5%FS)</small>	C1-2 (M3) <small>(C1-10%FS)</small>	C1-3 (M7) <small>(C1-7.5%HS)</small>	C1-4 (M8) <small>(C1-10%HS)</small>	C1-5 (M12) <small>(C1-7.5%SS)</small>	C1-6 (M13) <small>(C1-10%SS)</small>
R1j (Mpa)	Réf	18	16	14	20	20	16	16
	1%NC+0.05%TEA	25	20	16	26	24	18	20
	% / Réf	1.39	1.25	1.14	1.30	1.20	1.13	1.25
	1%NC+0.10%TEA	28	22	18	28	32	18	24
	% / Réf	1.56	1.38	1.29	1.40	1.60	1.13	1.50
R3j (Mpa)	Réf	25	32	34	36	30	30	28
	1%NC+0.05%TEA	32	40	42	40	36	38	30
	% / Réf	1.28	1.25	1.24	1.11	1.20	1.27	1.07
	1%NC+0.10%TEA	60	45	45	48	44	40	35
	% / Réf	2.40	1.41	1.32	1.33	1.47	1.33	1.25
R7j (Mpa)	Réf	38	60	56	44	42	40	35
	1%NC+0.05%TEA	40	72	56	48	44	44	40
	% / Réf	1.05	1.20	1.00	1.09	1.05	1.10	1.14
	1%NC+0.10%TEA	72	82	80	60	64	48	45
	% / Réf	1.89	1.37	1.43	1.36	1.52	1.20	1.29
R28j (Mpa)	Réf	60	74	76	65	70	62	64
	1%NC+0.05%TEA	72	96	78	68	76	68	74
	% / Réf	1.20	1.30	1.03	1.05	1.09	1.10	1.16
	1%NC+0.10%TEA	80	92	95	92	96	72	72
	% / Réf	1.33	1.24	1.25	1.42	1.37	1.16	1.13

Tableau 6.2 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de la combinaison de NC+TEA

L'examen du tableau 6.2 montre que tous les mélanges avec les combinaisons d'adjuvant NC et TEA ont des résultats mécaniques à toutes les échéances supérieures à celles des échantillons de référence.

Par ailleurs, le fait de doubler le dosage en TEA, lorsqu'il passe de 0.05% à 0.1% améliore de façon notable les résistances mécaniques notamment pour les échéances moyennes de 3 jours et 7 jours.

Les résultats indiquent aussi que les résistances les plus élevées sont obtenues avec les mélanges à 7.5 et 10% HS et pour lesquels la résistance à 28 jours augmente de 30 à 40% pour la combinaison 1% NC + 0.1% TEA.

6.1.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2

6.1.2.1 TEMPS DE PRISE

a- pâte pure à base de C2

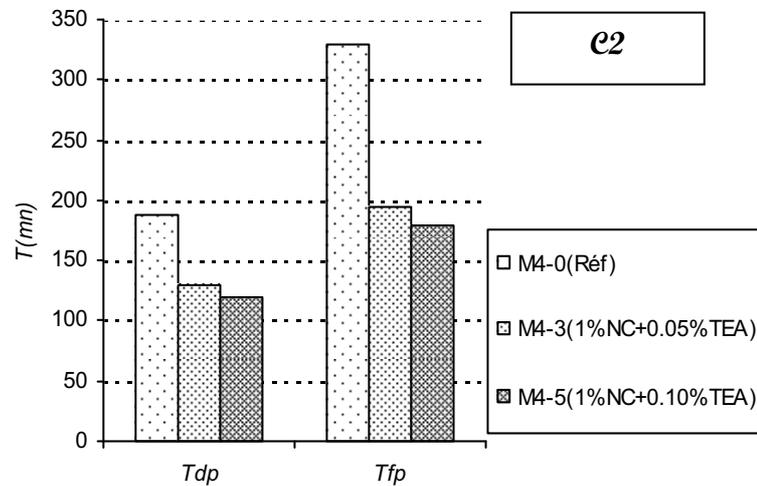


Figure 6.16 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M4-3 & M4-5

En additionnant 1% NC+0.05% TEA à un mélange de pâte pure à base du ciment C2 (M4-3), on fait diminuer le temps de début et de fin de prise de l'ordre de 30 à 40% par rapport au mélange de base M4-0. En augmentant le taux de TEA à 0.1% dans le mélange précédent (M4-5), on obtient globalement les mêmes améliorations (soit 35% à 45% par rapport à M4-0).

b- Mélanges C2- fumée de silice (FS)

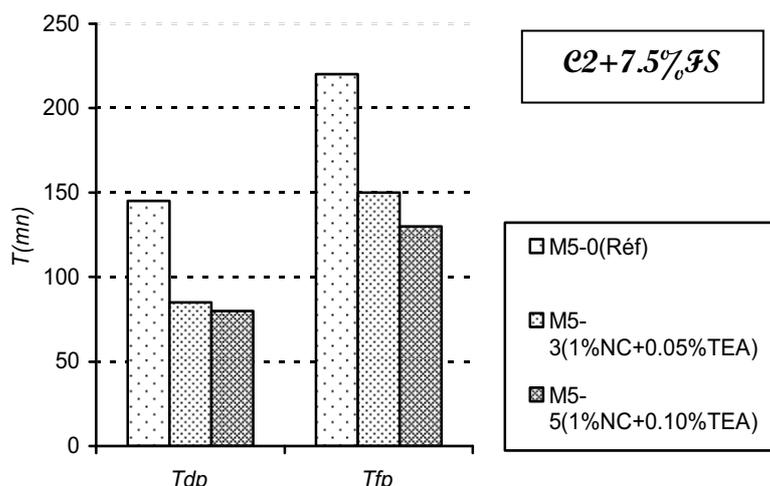


Figure 6.17 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M5-3 & M5-5

L'ajout de 1% NC+0.05% TEA dans un mélange à base de C2 et de 7.5% de FS (M5-3) permet d'améliorer le temps de début et de fin de prise respectivement de 40% et 30% par rapport au mélange de référence M5-0. Si on augmente le taux de TEA jusqu'à 0.1% (M5-5), l'amélioration des temps de début et fin de prise reste relativement la même que celle obtenue avec 0.05% de TEA soit respectivement 45% et 40% par rapport à M5-0.

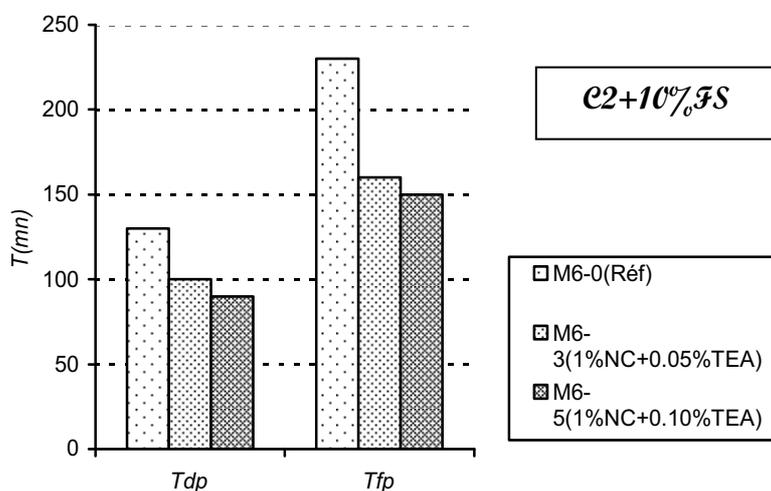


Figure 6.18 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M6-3 & M6-5

La figure 6.18 montre que si l'on utilise les mêmes combinaisons d'adjuvant que précédemment (1% NC+0.05% TEA pour M6-3 et 1%NC+0.10% TEA pour M6-5) dans un mélange de C2 avec 10% de FS on fait diminuer le temps de début de prise d'environ 20% à 30% et le temps de temps de fin de prise de 30 à 35% par rapport au mélange de référence M6-0.

c- Mélanges C2- sable HS

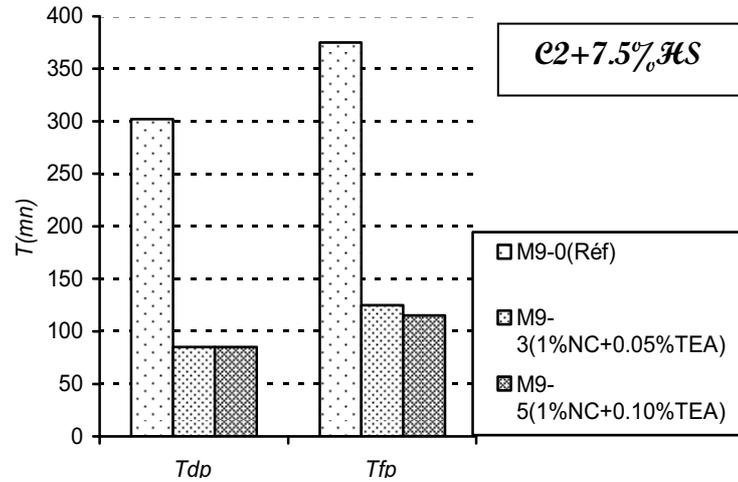


Figure 6.19: Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M9-3 & M9-5

Pour les mélanges C2 avec 7.5% de sable HS l'ajout de 1% NC+0.05% TEA (M9-3) ou de 1% NC+0.1% TEA (M9-5) conduit globalement à une amélioration considérable des temps de début et fin de prise d'environ 70% par rapport au mélange de base M9-0.

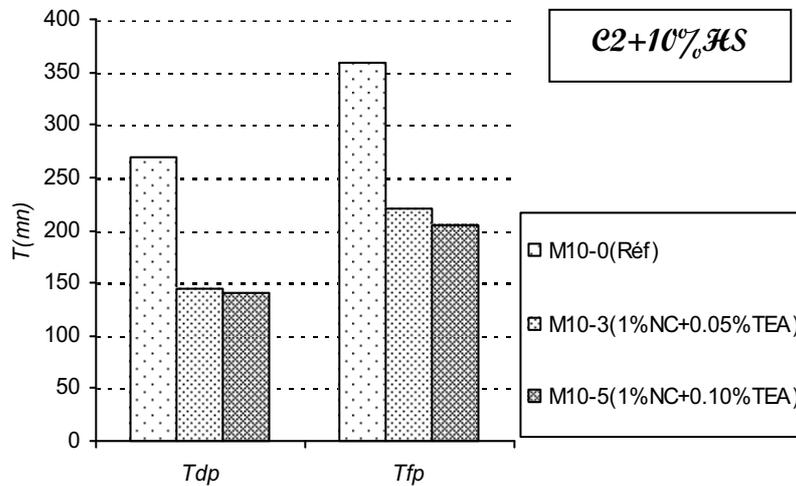


Figure 6.20 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélange M10-3 & M10-5

La figure 6.20 montre que si on garde les combinaisons d'adjuvant aux mêmes taux utilisés sur des mélanges dans lesquels on augmente le dosage du sable HS jusqu'à 10% (M10-3 et M10-5) cela engendre une amélioration des temps de début et fin de prise de l'ordre de 40 à 45%, par rapport au mélange de référence M10-0.

d- Mélanges C2- sable SS

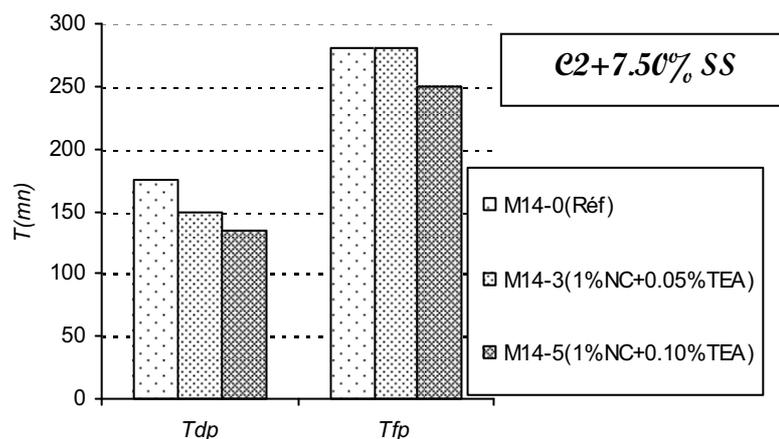


Figure 6.21 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M14-3 & M14-5

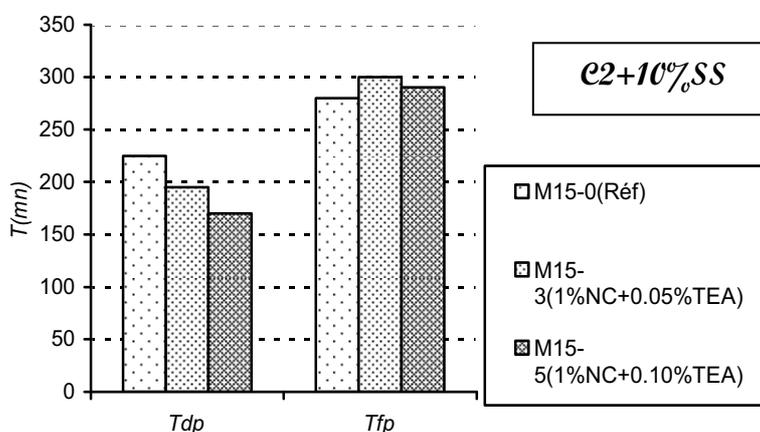


Figure 6.22 : Effet de NC combiné au TEA sur le temps de prise - Mélanges M15-3 & M15-5

Les figures 6.21 et 6.22 montrent que les différentes combinaisons d'adjuvants (1% NC+0.05% TEA et 1%NC+0.10% TEA) ajoutées aux mélanges avec sable siliceux SS aux taux de 7.5% (M14) ou 10% (M15) conduisent à des améliorations légères des temps de début de prise de l'ordre de 10 à 20% par rapport au mélange de référence et n'ont pas beaucoup d'influence sur les temps de fin de prise, à l'exception du mélange M14-5 qui diminue d'environ 10% par rapport à M14-0.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2 (M4) <small>(100%C2)</small>	C2-1 (M5) <small>(C2-7.5%FS)</small>	C2-2 (M6) <small>(C2-10%FS)</small>	C2-3 (M9) <small>(C2-7.5%HS)</small>	C2-4 (M10) <small>(C2-10%HS)</small>	C2-5 (M14) <small>(C2-7.5%SS)</small>	C2-6 (M15) <small>(C2-10%SS)</small>
TDP (min)	Réf	188	145	130	302	270	175	225
	1%NC+0.05%TEA	130	85	100	85	144	150	195
	% / Réf	69	59	77	<u>28</u>	53	86	87
	1%NC+0.10%TEA	120	80	90	85	140	135	170
	% / Réf	64	55	69	<u>28</u>	52	77	76
TFP (min)	Réf	330	220	230	375	360	280	280
	1%NC+0.05%TEA	195	150	160	125	220	280	300
	% / Réf	59	68	70	<u>33</u>	61	100	107
	1%NC+0.10%TEA	180	130	150	115	205	250	290
	% / Réf	55	59	65	<u>31</u>	57	89	104

Tableau 6.3 : Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de la combinaison NC + TEA

En conclusion et d'après le récapitulatif du tableau 6.2 nous pouvons dire que :

1. la combinaison d'adjuvants NC (accélérateur de prise) et de TEA (accélérateur de durcissement) sur les mélanges à base de C2 améliore d'une manière générale les temps de début et de fin de prise pour tous les mélanges. Il est à noter que cette amélioration est très spectaculaire dans le cas du mélange avec 7.5% de sable siliceux HS, à l'inverse elle est très modérée pour les mélanges de sable siliceux SS.
2. l'utilisation du TEA avec un dosage double (0.1%) n'apporte que peu de modifications par rapport aux résultats obtenus avec un dosage de 0.05%.

6.1.2.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C2

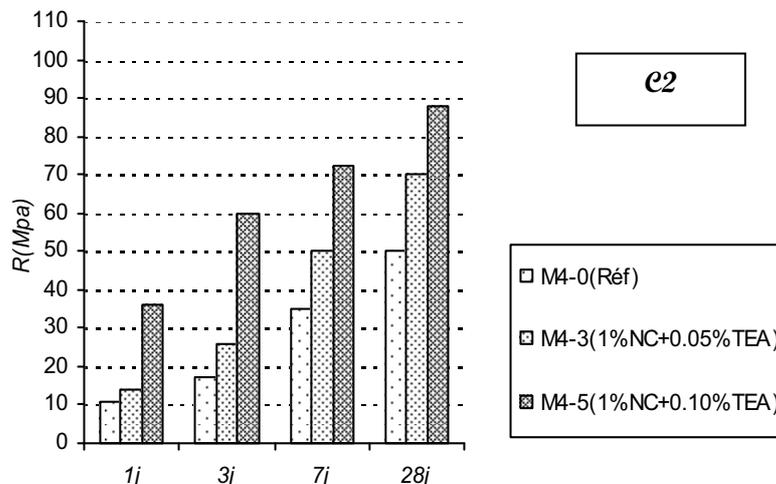


Figure 6.23 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M4-3 & M4-5

Concernant les résistances mécaniques en compression simple, l'injection d'une combinaison de 1% NC avec 0.05% TEA (M4-3) au mélange de pâte pure C2 les fait augmenter d'environ 25% à 1 jour, 50% à 3 jours, 40% à 7 et 28 jours par rapport à M4-0. Si on double le taux de TEA dans ces mélanges (M4-3), l'amélioration des résistances mécaniques est spectaculaire. Elle est d'environ 225% à 1 jour, 250% à 3 jours, 105% à 7 jours et de 40% à 28 jours par rapport M4-0.

b – Mélanges C2 – fumée de silice (FS)

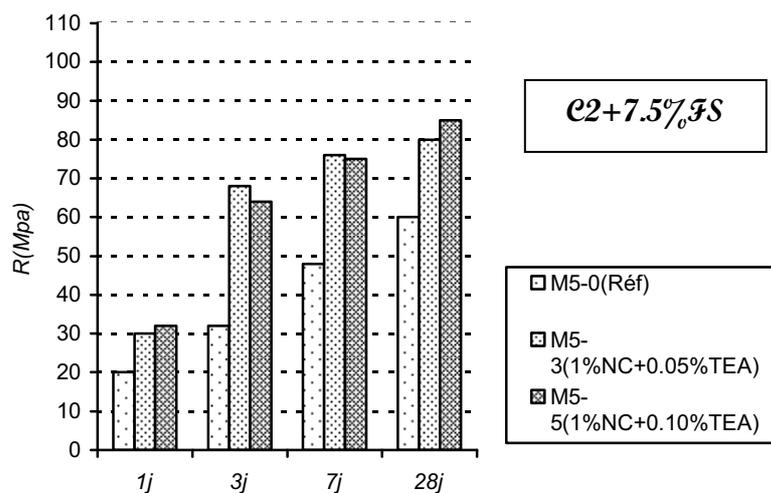


Figure 6.24 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M5-3 & M5-5

Pour les mélanges à base de C2 et de 7.5% de FS, l'addition de 1% NC+0.05% TEA (M5-3) ou de 1%NC+0.10% TEA (M5-5) permet à la résistance mécanique d'augmenter de l'ordre de 50 à 60% à 1 jour, de 100 à 115% à 3 jours, 55% à 7jours et 30 à 40% à 28 jours par rapport au mélange de référence M5-0.

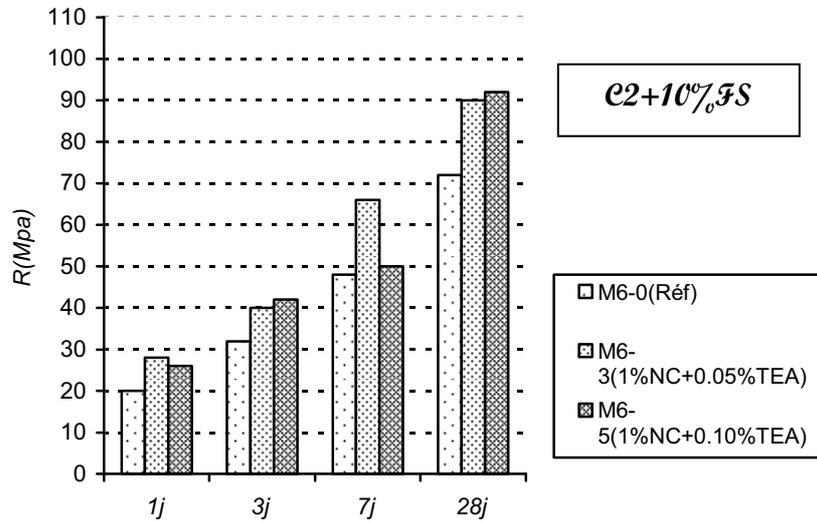


Figure 6.25 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M6-3 & M6-5

Si on reprend les mêmes combinaisons d'adjuvants avec les mêmes mélanges où le taux de FS passe à 10% (M6-3 et M6-5), on s'aperçoit que l'amélioration des résistances mécaniques n'est pas aussi importante que celle obtenue précédemment. Ainsi, elle est d'environ 30 à 40% à 1 jour, 25% à 3 jours, et 25% à 28 jours par rapport à M6-0. Le cas de la résistance à 7 jours reste inexplicable. Elle évolue d'environ 40% dans le cas du mélange M6-3 et n'évolue pratiquement pas pour le mélange M6-5.

c - Mélanges C2 – sable HS

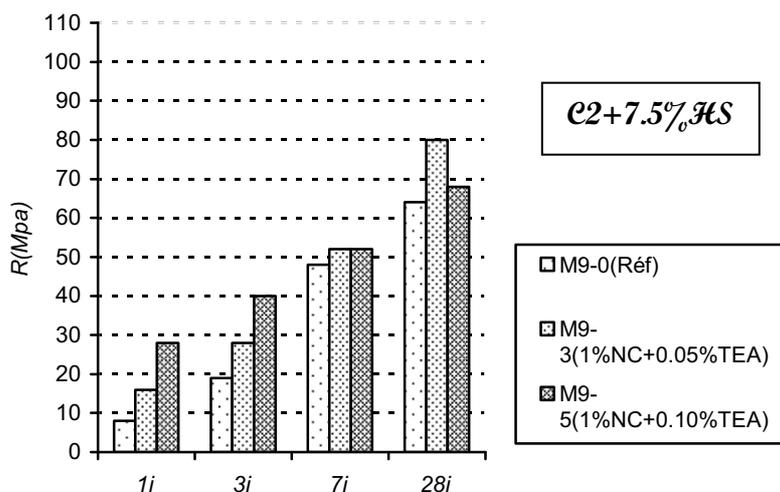


Figure 6.26 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M9-3 & M9-5

Dans le cas des mélanges avec 7.5% de sable HS, les combinaisons d'adjuvants NC et TEA agissent essentiellement sur les résistances aux très jeunes âges. Ainsi, on obtient des améliorations d'environ 100% à 1 jour et 45% à 3 jours pour le mélange M9-3. cette amélioration est encore plus importante dans le cas du mélange M9-5, elle atteint 250% à 1jour, 110% à 3 jours. Pour les résistances à 7 et 28 jours cette amélioration reste modérée pour les 2 mélanges par rapport au mélange de référence.

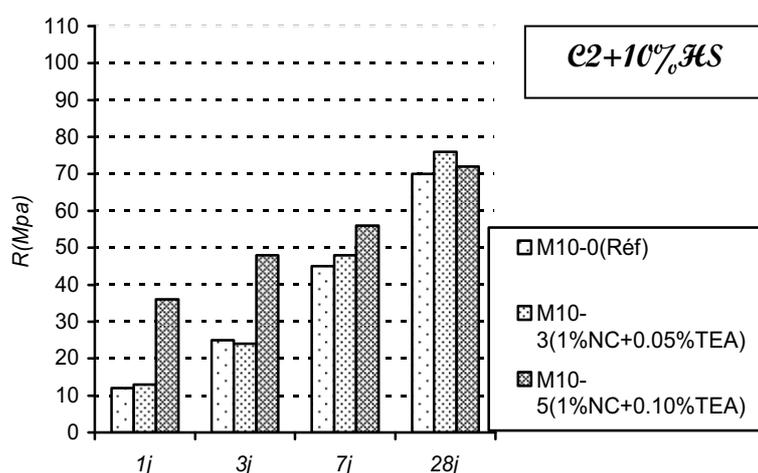


Figure 6.27 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M10-3 & M10-5

Pour les mélanges avec 10% de sable HS, la combinaison de 1% NC et de 0.05% TEA (M10-3) n'affecte pas ou très peu les résistances mécaniques. Par contre la combinaison de 1%NC et 0.10% TEA (M10-5) conduit au même phénomène observé pour le mélange M9-5

précédent. Ainsi les résistances aux très jeunes âges sont améliorées d'une manière très importante (environ 200% à 1jour et 90% à 3 jours par rapport à M10-0), celles à 7 et 28 jours subissent une amélioration très modérée respectivement de 25% et 5% par rapport au mélange de référence.

d- Mélange C2-sable SS

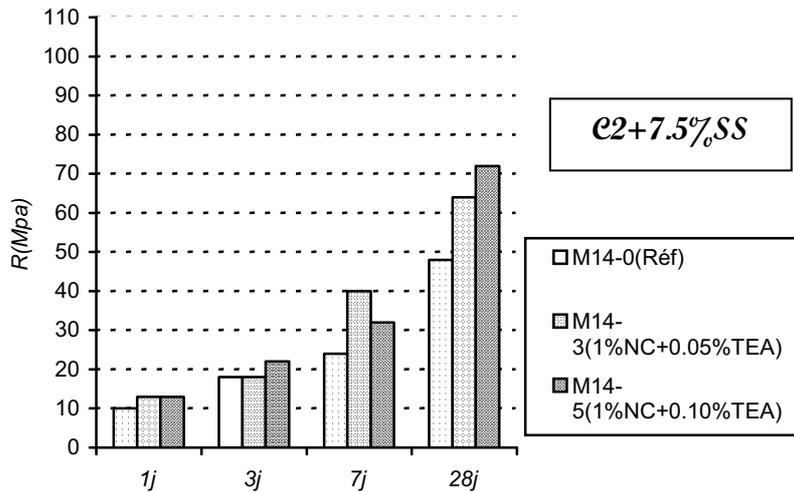


Figure 6.28 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélanges M14-3 & M14-5

Pour les mélanges avec 7.5% de sable SS, les combinaisons de 1% NC+0.05% TEA (M14-3) et de 1% NC+0.10% TEA (M14-5) agissent sur les résistances à long terme. Ainsi, elles conduisent à une augmentation des résistances mécaniques de l'ordre de 30 (M14-5) à 65% (M14-3) à 7jours, de l'ordre de 30% à 28 jours et n'a pas ou très peu d'influence sur celles à 1 et 3 jours.

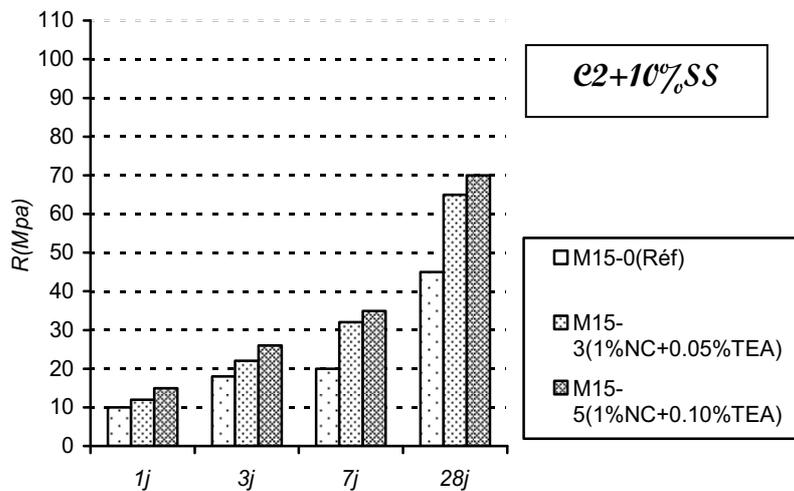


Figure 6.29 : Effet de NC combiné au TEA sur l'évolution des résistances - Mélange M15-3 & M15-5

Le phénomène évoqué précédemment se confirme également pour les mélanges avec 10% de sable SS. Ainsi les deux combinaisons d'adjuvant conduisent à des augmentations des résistances mécaniques à 7 jours de l'ordre de 60 à 75% et à 28 jours de l'ordre de 45 à 55% par rapport au mélange de référence. L'évolution des résistances à 1 et 3 jours dans le cas du M15-3 reste relativement modérée (20% par rapport M15-0), par contre celle du mélange M15-5 est plus élevée, de l'ordre de 50% par rapport à M15-0.

e – Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2 (M4) (100%C2)	C2-1 (M5) (C2-7.5%FS)	C2-2 (M6) (C2-10%FS)	C2-3 (M9) (C2-7.5%HS)	C2-4 (M10) (C2-10%HS)	C2-5 (M14) (C2-7.5%SS)	C2-6 (M15) (C2-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	11	20	20	8	12	10	10
	1%NC+0.05%TEA	14	30	28	16	13	13	12
	% / Réf	1.27	1.50	1.40	2.00	1.08	1.30	1.20
	1%NC+0.10%TEA	36	32	26	28	36	13	15
	% / Réf	3.27	1.60	1.30	3.50	3.00	1.30	1.50
R3j (Mpa)	Réf	17	32	32	19	25	18	18
	1%NC+0.05%TEA	26	68	40	28	24	17	22
	% / Réf	1.53	2.13	1.25	1.47	0.96	0.94	1.22
	1%NC+0.10%TEA	60	64	42	40	48	22	26
	% / Réf	3.53	2.00	1.31	2.11	1.92	1.22	1.44
R7j (Mpa)	Réf	35	48	48	48	45	24	20
	1%NC+0.05%TEA	50	76	66	52	48	40	32
	% / Réf	1.43	1.58	1.38	1.08	1.07	1.67	1.60
	1%NC+0.10%TEA	72	75	50	52	56	32	35
	% / Réf	2.06	1.56	1.04	1.08	1.24	1.33	1.75
R28j (Mpa)	Réf	50	60	72	64	70	48	45
	1%NC+0.05%TEA	70	80	90	80	76	64	65
	% / Réf	1.40	1.33	1.25	1.25	1.09	1.33	1.44
	1%NC+0.10%TEA	88	85	92	68	72	72	70
	% / Réf	1.76	1.42	1.28	1.06	1.03	1.50	1.56

Tableau 6.4 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de NC+TEA

L'examen des résultats du tableau 6.3 montre que d'une façon générale les résistances mécaniques sont améliorées par l'utilisation de combinaison d'adjuvant. A nouveau comme pour le ciment C1, le doublement du dosage en TEA, passant de 0.05% à 0.1% permet d'obtenir des résistances plus élevées mais de manière inégale suivant le mélange de base et les données d'hydratation.

A courte échéance le mélange à base de C2 et les mélanges à 7.5% HS et 10% HS sont les plus sensibles puisque l'augmentation de résistance triple par rapport aux mélanges de référence. Par contre à 28 jours la croissance des résistances est plus modérée et ne dépasse pas 10-15% pour les mélanges à base de HS.

Par contre pour les autres mélanges, l'amélioration des résistances est plus faible à court terme que les mélanges C2 et HS mais, elle atteint en moyenne 50% à 28 jours.

6.2 EFFET DU DOSAGE EN TIPA COMBINE AU NITRATE DE CALCIUM

6.2.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1

6.2.1 TEMPS DE PRISE

a- Pâte pure à base de C1

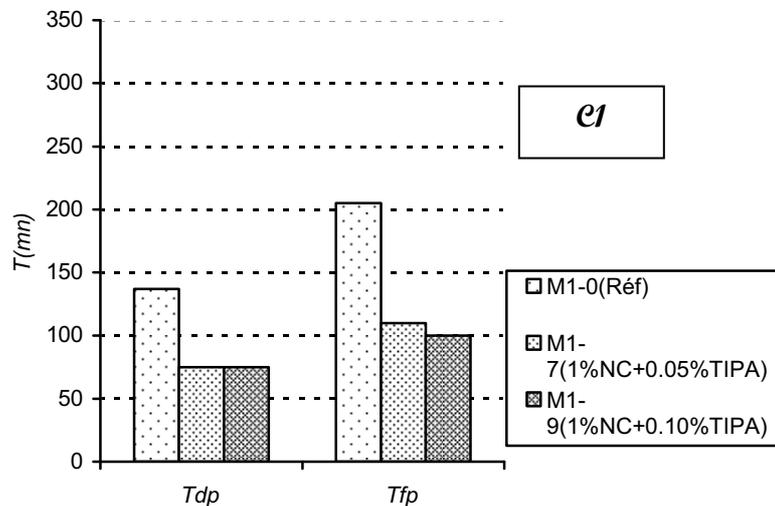


Figure 6.30 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M1-7 & M1-9

Dans la pâte pure à base de C1, l'introduction de 1% NC avec 0.05% TIPA (M1-7) ou 0.10% TIPA (M1-9) permet de diminuer le temps de début et de fin de prise globalement de 45% par rapport au mélange de référence M1-0.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

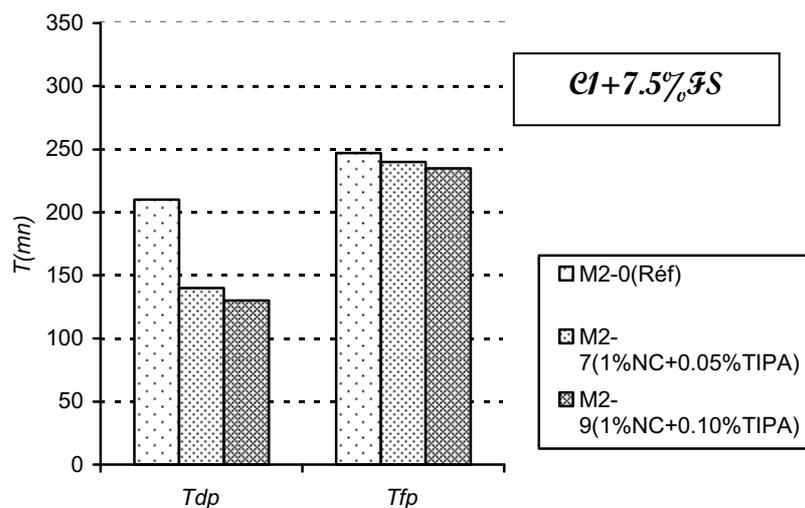


Figure 6.31 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M2-7 & M2-9

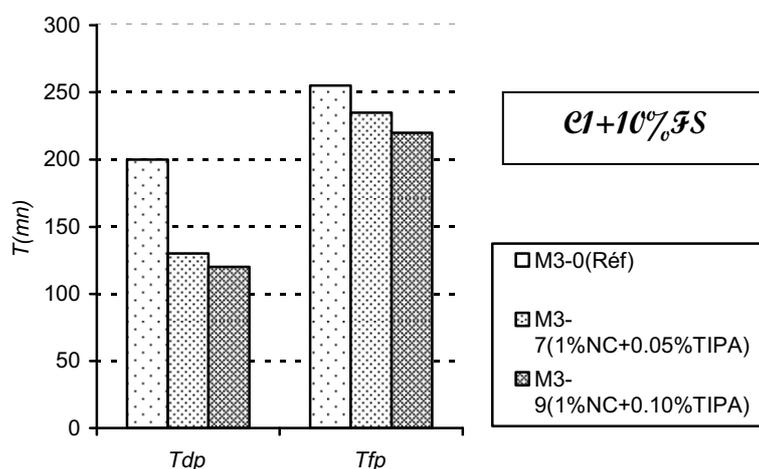


Figure 6.32 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M3-7 & M3-9

Les figures 6.31 et 6.32 montre que dans les mélanges avec fumée de silice (FS) les combinaisons de 1% NC avec 0.05% TIPA (M2-7) ou avec 0.10% TIPA (M2-9) agissent sur le temps de début de prise en conduisant à des diminutions de l'ordre de 30 à 40% par rapport au mélange référence. Quant au temps de fin de prise, il n'est près pas affecté dans le cas des mélanges M2 et très modérément réduit (15%) lorsque le taux de FS atteint 10% (M3).

c- Mélanges C1-HS

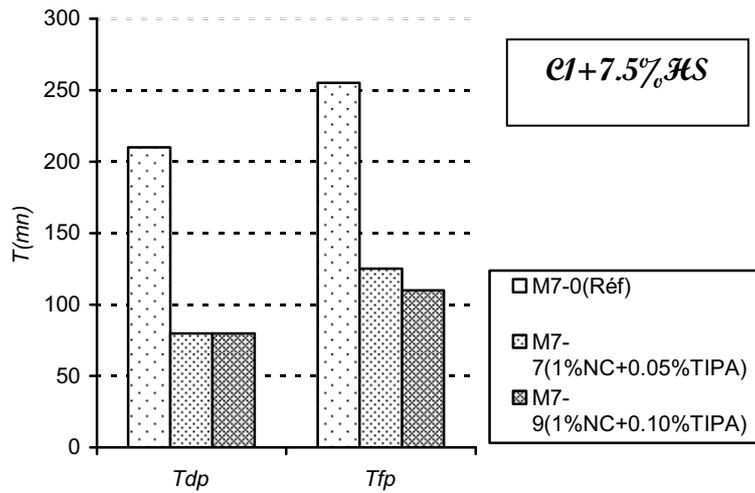


Figure 6.33 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M7-7 & M7-9

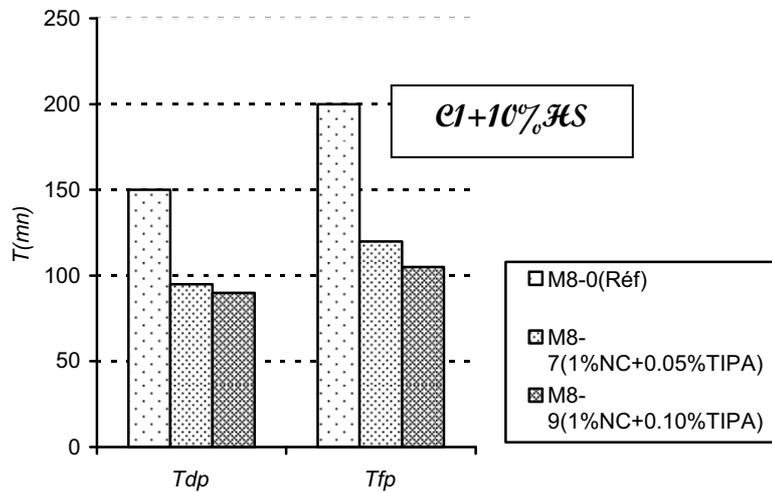


Figure 6.34 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M8-7 & M8-9

D'après les histogrammes des figures 6.33 et 6.34, on peut constater que les combinaisons de 1% NC+0.05% TIPA ou de 1%NC+0.10% TIPA conduisent, dans le cas des mélanges à 7.5% de sable siliceux HS (M7-7 et M7-9), à des améliorations des temps de début et de fin de prise de l'ordre de 50 à 60% par rapport au mélange de référence. Quand le taux de HS passe à 10% (M8-0 et M8-9), cette amélioration est légèrement moins importante, de l'ordre de 35 à 45% par rapport à M8-0.

d- Mélange C1-SS

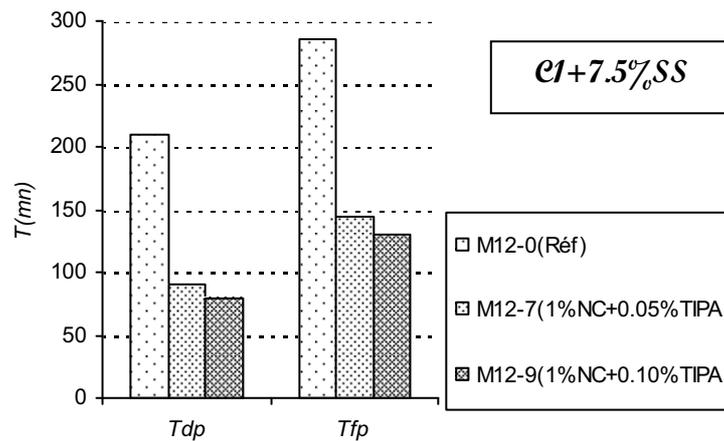


Figure 6.35 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M12-7 & M12-9

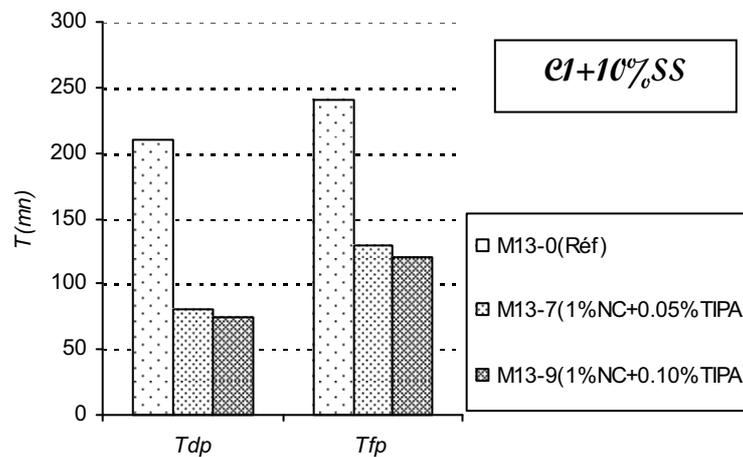


Figure 6.36 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M13-7 & M13-9

Dans les mélanges avec sable siliceux (figures 6.35 et 6.36), l'ajout de 1% NC+0.05% TIPA ou 1%NC+0.10% TIPA conduit globalement à une amélioration des temps de début et de fin de prise respectivement de 60% et de l'ordre de 45 à 55% par rapport aux mélanges de références.

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1 (M1) (100%C1)	C1-1 (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2 (M3) (C1-10%FS)	C1-3 (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4 (M8) (C1-10%HS)	C1-5 (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6 (M13) (C1-10%SS)
TDP (min)	Réf	137	210	200	210	150	210	210
	1%NC+0.05%TIPA	75	140	130	80	95	90	80
	% / Réf	55	67	65	38	63	43	38
	1%NC+0.10%TIPA	75	130	120	80	90	80	75
	% / Réf	55	62	60	38	60	38	36
TFP (min)	Réf	205	247	255	255	200	285	240
	1%NC+0.05%TIPA	110	240	235	125	120	145	130
	% / Réf	54	97	92	49	60	51	54
	1%NC+0.10%TIPA	100	235	220	110	105	130	120
	% / Réf	49	95	86	43	53	46	50

Tableau 6-5 : Récapitulatif des temps de prise des mélange à base de ciment C1 sous l'effet de la combinaison NC+TIPA

Le tableau 6.4 montre que la combinaison de NC –TIPA permet d'améliorer d'une manière importante les temps de début et de fin de prise des mélanges à base de C1 dans lesquels des additions siliceuses ont été substituées à une partie du ciment (7.5 ou 10% en poids).

Néanmoins on peut faire deux constatations importantes :

1. Le fait de ramener le taux de la TIPA à 0.1% au lieu de 0.05% dans les combinaisons d'adjuvant ne réduit pas davantage les temps de début et de fin de prise ;
2. L'augmentation du dosage des additions siliceuses à 10% dans les mélanges cimentaires ne modifie pas ces mêmes paramètres.

6.2.1.2 RESISTANCES MECANIQUES

Après avoir étudié l'influence des différentes combinaisons NC-TIPA sur les temps de début et de fin de prise des mélanges siliceux à base de C1, nous allons examiner à présent leurs influences sur les résistances mécaniques de ces mêmes mélanges.

a- Pâte pure à base de C1

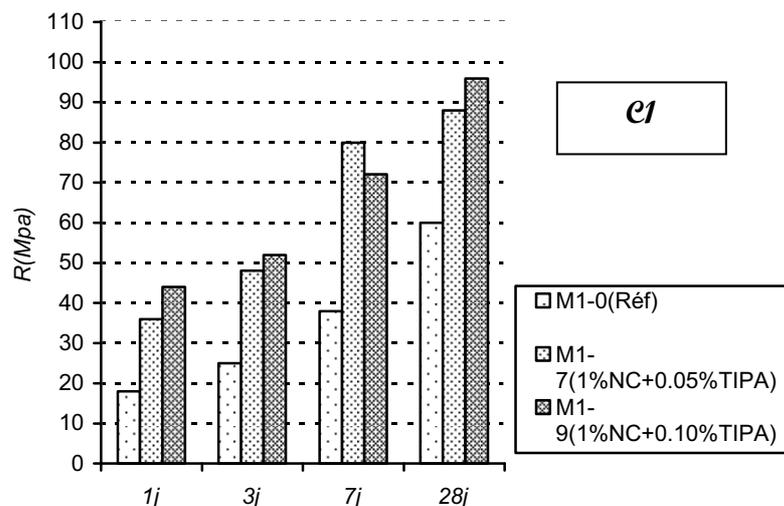


Figure 6.37 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M1-7 & M1-9

La figure 6.37 montre que pour le mélange de pâte pure C1, l'introduction de la combinaison 1%NC+0.05%TIPA (M1-7) conduit à une amélioration de la résistance mécanique de 100% à 1jour, 90% à 3jours, 110% à 7jours et 60% à 28 jours par rapport au mélange M1-0. La combinaison de 1%NC+0.10% TIPA (M-9) conduit à une augmentation plus importante à 1 jour d'environ 145% par rapport au mélange de référence, cependant l'amélioration de la résistance aux autres échéances est globalement similaire à celle obtenue pour la combinaison d'adjuvant au dosage de 0.05% TIPA.

b- Mélanges C1- fumée de silice (FS)

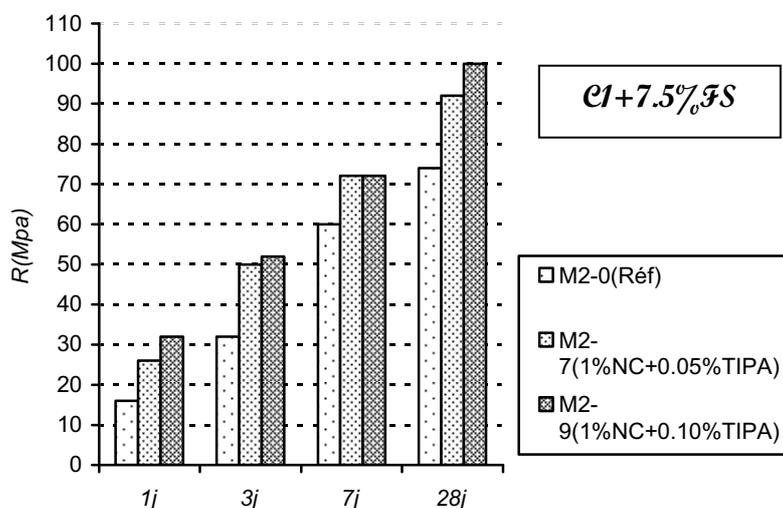


Figure 6.38: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M2-7 & M2-9

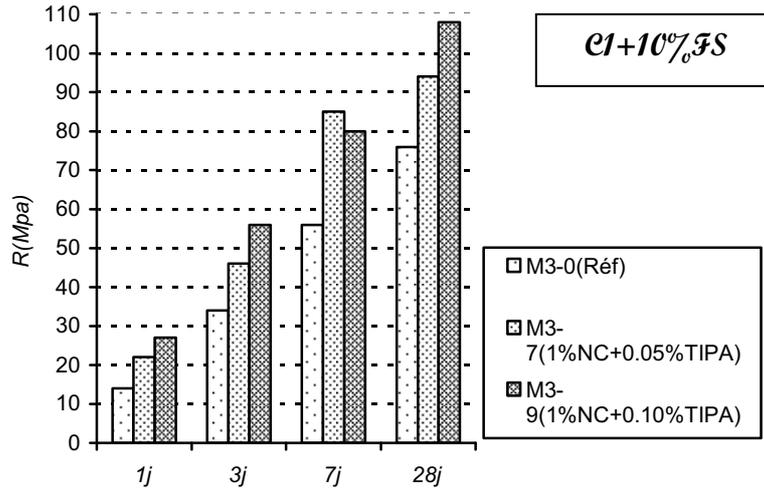


Figure 6.39 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M3-7 & M3-9

Les figures 6.38 et 6.39 montre que l'introduction de 1%NC+0.05% TIPA dans les mélanges à 7.5% de FS (M2-7) ou 10% de FS (M3-7) conduit globalement à la même amélioration de la résistance mécanique soit, environ 60% à 1jour, 40 à 50 % à 3jours, 25% à 28 jours. Quand on passe à une combinaison d'adjuvant avec un taux en TIPA de 0.1% l'amélioration des résistances mécaniques est plus importante que celle de la combinaison d'adjuvant précédente mais du même ordre pour les deux mélanges à 7.5% FS (M2-9) 10% FS (M3-9) soit globalement de l'ordre de 90 à 100% à 1jour, 60% à 3 jours, et 40% à 28 jours.

c- Mélanges C1-HS

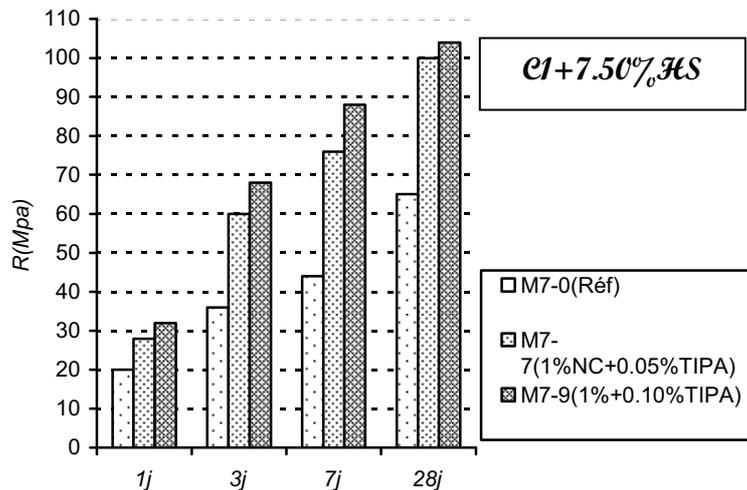


Figure 6.40 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M7-7 & M7-8

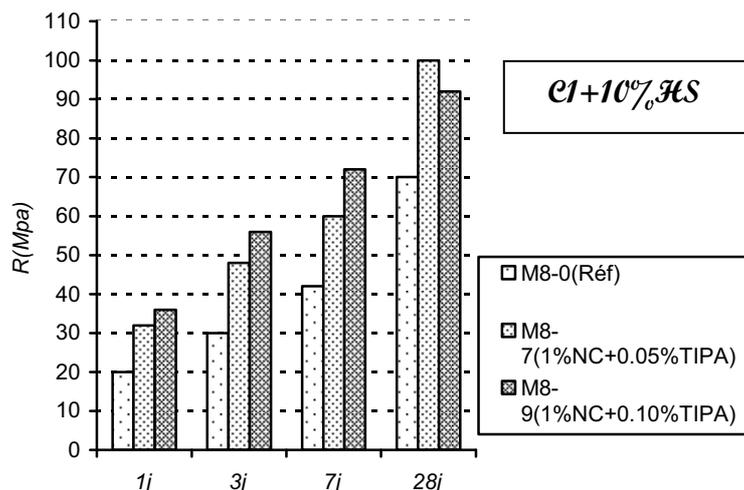


Figure 6.41 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M8-7 & M8-9

Pour les mélanges avec sable siliceux HS (7.5 ou 10%) l'addition de 1%NC+0.05% TIPA (M7-7 et M8-7) conduit à une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 40 à 60% à 1jour, 60% à 3jours, 45 à 70% à 7jours et 40 à 55% à 28 jours par rapport aux mélanges de références M7-0 et M8-0. La combinaison de 1%NC+0.10% TIPA conduit à une augmentation plus importante mais du même ordre dans le cas des deux mélanges (M7-9 et M8-9) soit de l'ordre de 60 à 80% à 1jour, 90% à 3jours, 70 à 100% à 7jours et 60 et 30% respectivement pour M7-9 et M8-9 à 28 jours par rapport aux mélanges de références. Enfin, on constate la même évolution que dans le cas des mélanges avec fumée de silice.

d- Mélange C1-SS

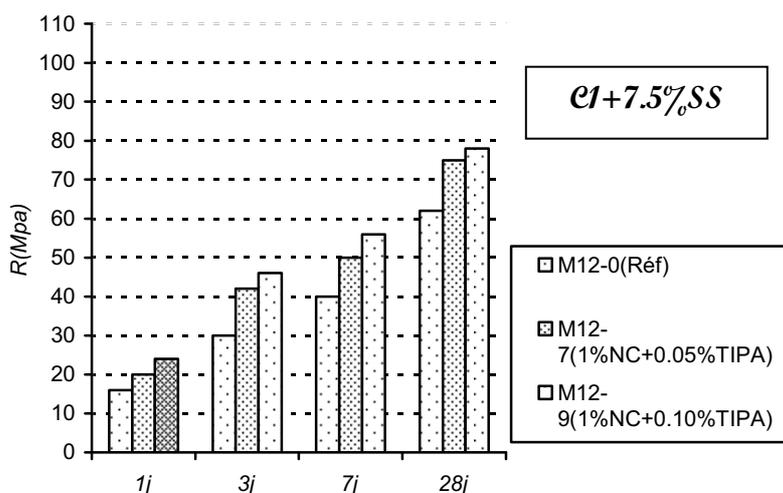


Figure 6.42 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M12-7 & M12-9

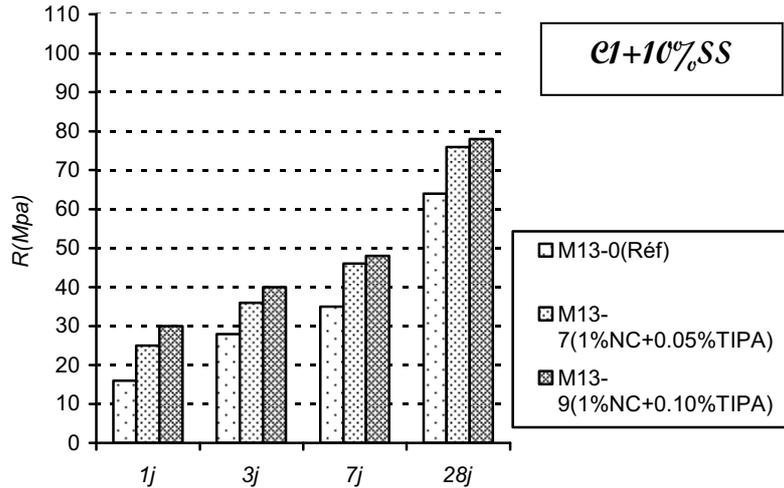


Figure 6.43 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M13-7 & M13-9

D'après les figures 6.42 et 6.43, nous constatons les mêmes phénomènes observés précédemment ; les améliorations de résistances mécaniques sont moins importantes que celles obtenues dans le cas des mélanges FS et HS à savoir :

- l'introduction de 1%NC+0.05% TIPA dans les mélanges avec du sable siliceux SS (M12-7 et M13-7) conduit à l'augmentation de la résistance mécanique d'environ 25% à 50% à 1jour, 30 à 40% à 3jours, 25% à 7jours et 20% à 28 par rapport aux valeurs des mélanges de références M12-0 et M13-0.
- l'introduction de 1%NC+0.10% TIPA dans mêmes les mélanges (M12-9 et M13-9) conduit à une augmentation de la résistance d'environ 40 à 50% 3 jours, 40% à 7 jours et 20% à 28 jours par rapport aux mélanges de références. Quant à la résistance à 1jour, elle augmente de 50% et de 90% par rapport aux mélanges de référence respectivement pour M12-9 et M13-9.

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C1 (M1) (100%C1)	C1-1 (M2) (C1-7.5%FS)	C1-2 (M3) (C1-10%FS)	C1-3 (M7) (C1-7.5%HS)	C1-4 (M8) (C1-10%HS)	C1-5 (M12) (C1-7.5%SS)	C1-6 (M13) (C1-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	18	16	14	20	20	16	16
	1%NC+0.05%TIPA	36	26	22	28	32	20	25
	% / Réf	2.00	1.63	1.57	1.40	1.60	1.25	1.56
	1%NC+0.10%TIPA	44	32	27	32	36	24	30
	% / Réf	2.44	2.00	1.93	1.60	1.80	1.50	1.88
R3j (Mpa)	Réf	25	32	34	36	30	30	28
	1%NC+0.05%TIPA	48	50	46	60	48	42	36
	% / Réf	1.92	1.56	1.35	1.67	1.60	1.40	1.29
	1%NC+0.10%TIPA	52	52	56	68	56	46	40
	% / Réf	2.08	1.63	1.65	1.89	1.87	1.53	1.43
R7j (Mpa)	Réf	38	60	56	44	42	40	35
	1%NC+0.05%TIPA	80	72	85	76	60	50	46
	% / Réf	2.10	1.20	1.52	1.73	1.43	1.25	1.31
	1%NC+0.10%TIPA	72	72	80	88	72	56	48
	% / Réf	1.89	1.20	1.43	2.00	1.71	1.40	1.37
R28j (Mpa)	Réf	60	74	76	65	70	62	64
	1%NC+0.05%TIPA	88	92	94	100	100	75	76
	% / Réf	1.47	1.24	1.24	1.54	1.43	1.21	1.19
	1%NC+0.10%TIPA	96	100	108	104	92	78	78
	% / Réf	1.60	1.35	1.42	1.60	1.31	1.26	1.22

Tableau 6-6: Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges à base de ciment C1 sous l'effet de NC+ TIPA

Globalement la combinaison des adjuvants aux concentrations de 0.05% et 0.1% de TIPA donne lieu à des augmentations de résistance pour tous les mélanges et à toutes les échéances d'au moins 20%.

Le fait de doubler le dosage en TIPA améliore en général les résistances mais de façon modérée, de l'ordre de 10 à 15%.

A nouveau comme pour la triéthanolamine, les résultats le plus intéressants en matière d'augmentation de la résistance sont obtenus avec le mélange de base C1 et les mélanges C1-HS

6.2.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2

6.2.2.1 TEMPS DE PRISE

a- Pâte pure à base de C2

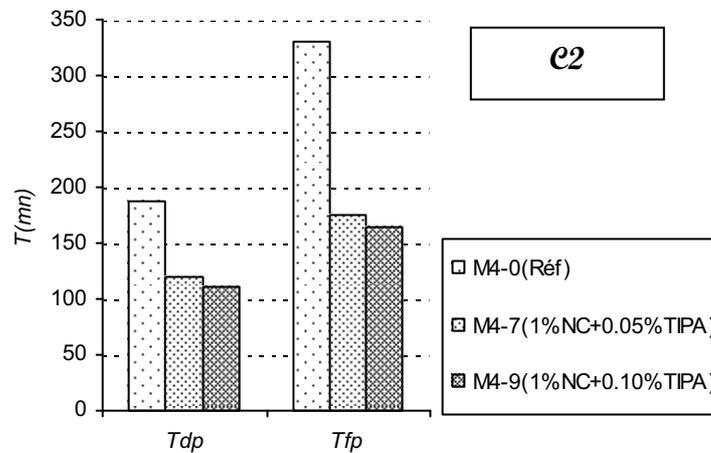


Figure 6.44 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M4-7 & M4-9

La figure 6.44 montre qu'une addition de 1% NC+0.05% TIPA (M4-7) ou 1% NC+0.1% TIPA (M4-9) peut conduire à une amélioration des temps de début de fin de prise d'environ 35% à 50% par rapport au mélange de référence de la pâte pure de ciment à base de C2.

b- Mélanges C2- fumée de silice (FS)

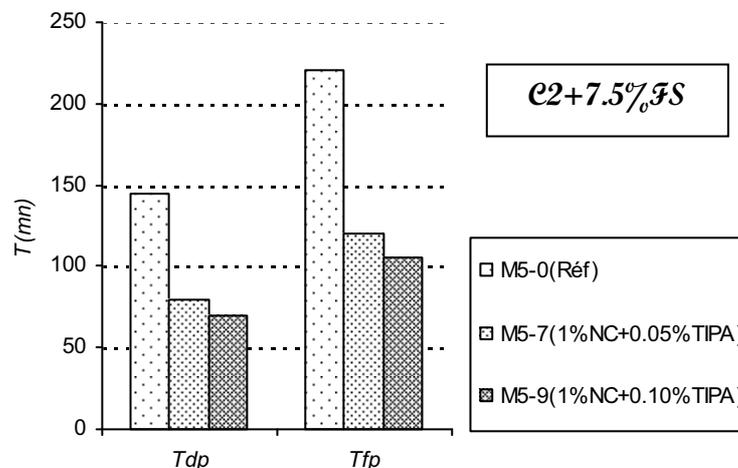


Figure 6.45: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M5-7 & M5-9

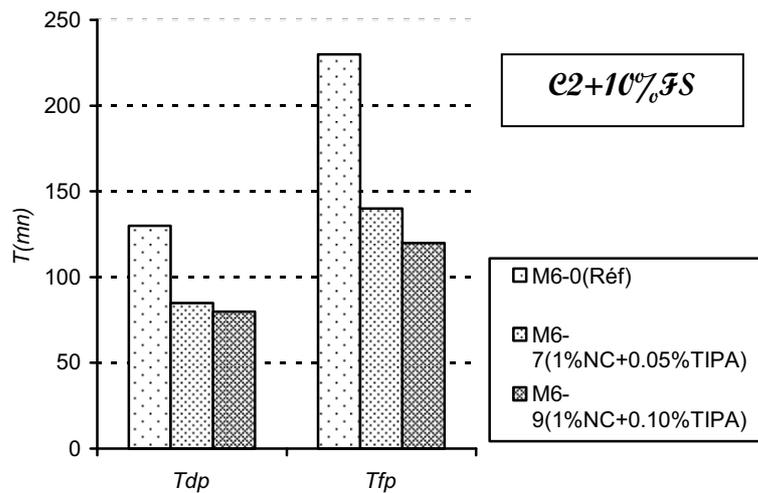


Figure 6.46: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélange M6-7 & M6-9

Si l'on introduit 1% NC+0.05% TIPA ou 1%NC+0.10% TIPA dans un mélange à base de C2 et de 7.5 ou 10% de FS (M5-7et M5-9 ou M6-7 et M6-9), on permet l'amélioration des temps de début et de fin de prise globalement d'environ 35 à 50% par rapport aux mélanges de référence.

c- Mélanges C2-HS

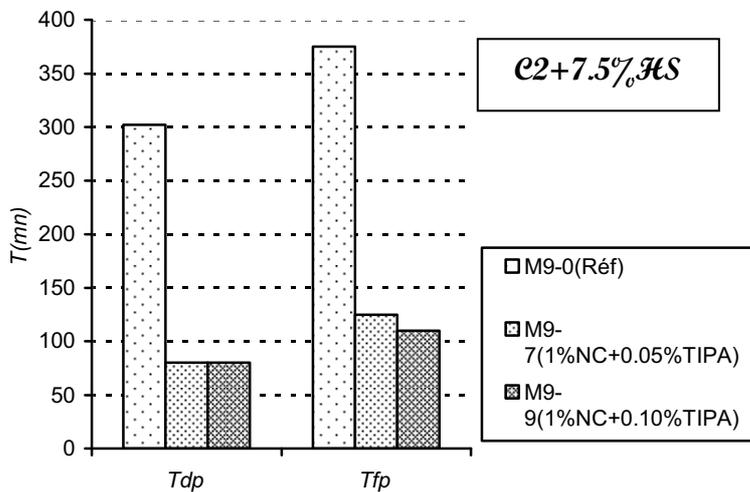


Figure 6.47: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M9-7 & M9-9

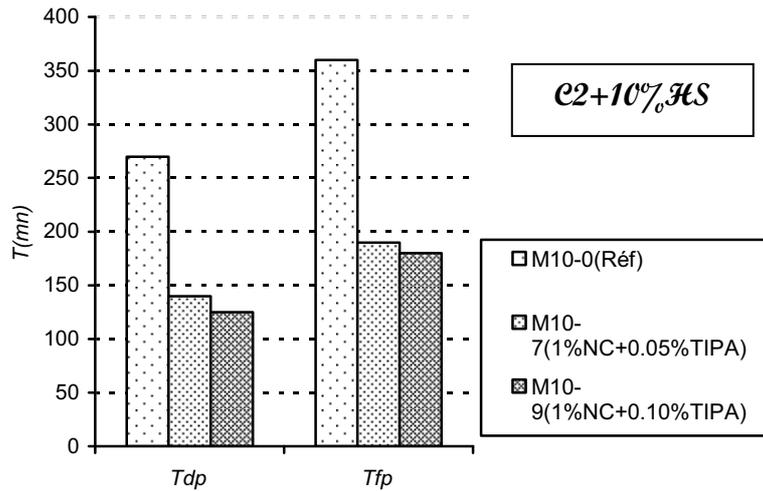


Figure 6.48: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M10-7 & M10-9

Si l'on introduit une quantité d'adjuvant de 1% NC+0.05% TIPA ou de 1%NC+0.10% TIPA dans un mélange à base de ciment C2 et de 7.5% de sable HS, on diminue les temps de début et de fin de prise d'environ 65 à 75% par rapport au mélange de référence M9-0. Cependant, si l'on utilise le mélange à base de C2 avec 10% sable HS, l'ajout de l'une ou l'autre des deux combinaisons d'adjuvant précédentes ne conduisent qu'à une diminution des temps de début et de fin de prise d'environ 45 à 50% par rapport au mélange de référence.

d- Mélange C2-SS

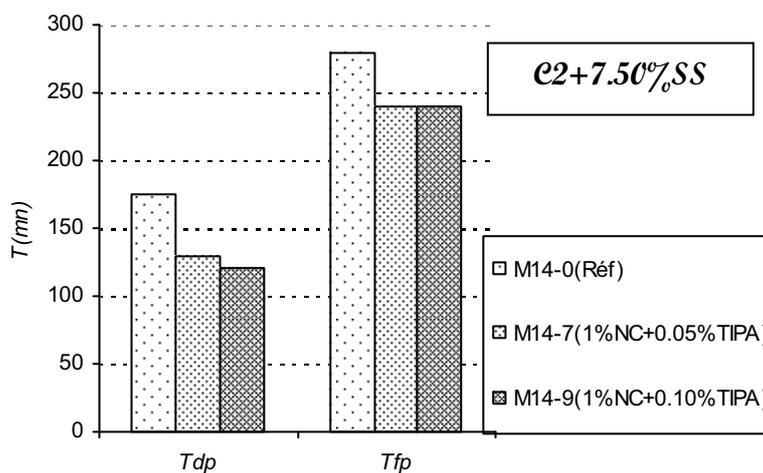


Figure 6.49 : Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise - Mélanges M14-7 & M14-9

L'injection d'un couple de 1% NC+0.05% TIPA (M14-7) fait diminuer le temps de début de prise d'environ 35% et le temps de fin de prise de 15% par rapport au mélange de base M14-0.

Par contre en doublant le taux de TIPA c'est-à-dire 1%NC+0.10% TIPA, on diminue respectivement le temps de début de prise et le temps de fin de prise d'environ 30% et 15%.

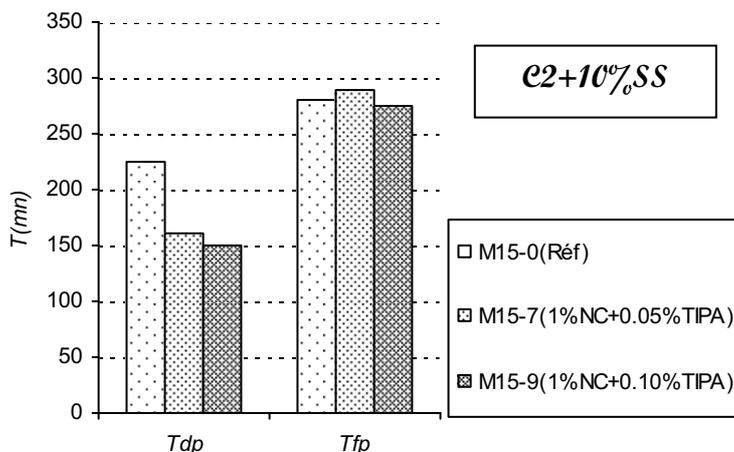


Figure 6.50: Effet de NC combiné à TIPA sur le temps de prise -Mélanges M15-7 & M15-9

D'après les histogrammes des figures 6.49 et 6.50, l'injection d'une combinaison d'adjuvant de 1% NC+0.05% TIPA ou de 1% NC+0.1% TIPA dans des mélanges à base de C2 et de sable SS (à 7.5% pour M14-7 et M14-9 ou à 10% pour M15-7 et M15-9) agit sur les temps de début de prise en les améliorant d'environ 30% par rapport aux valeurs des mélanges de référence. En revanche, elles n'ont aucun effet ou très peu sur les temps de fin de prise (amélioration de 5 à 15% par rapport aux références).

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2* (M4) (100%C2)	C2-1* (M5) (C2-7.5%FS)	C2-2* (M6) (C2-10%FS)	C2-3* (M9) (C2-7.5%HS)	C2-4* (M10) (C2-10%HS)	C2-5* (M14) (C2-7.5%SS)	C2-6* (M15) (C2-10%SS)
TDP (min)	Réf	188	145	130	302	270	175	225
	1%NC+0.05%TIPA	120	80	85	80	140	130	160
	% / Réf	64	55	65	<u>26</u>	52	74	71
	1%NC+0.10%TIPA	110	70	80	80	125	120	150
	% / Réf	59	48	62	<u>26</u>	46	69	67
TFP (min)	Réf	330	220	230	375	360	280	280
	1%NC+0.05%TIPA	175	120	140	125	190	240	290
	% / Réf	53	55	61	<u>33</u>	53	86	104
	1%NC+0.10%TIPA	165	105	120	110	180	240	275
	% / Réf	50	48	52	<u>29</u>	50	86	98

Tableau 6-7: Récapitulatif des temps de prise des mélanges à base de ciment C2 sous l'effet de la combinaison NC+TIPA

Le tableau 6.7 montre que les temps de début et fin de prise sont considérablement réduits pour tous les mélanges à l'exception des mélanges C2-SS pour lesquels la diminution est très modérée, de l'ordre de 13%.

6.2.2.2 RESISTANCES MECANIQUES

a- Pâte pure à base de C2

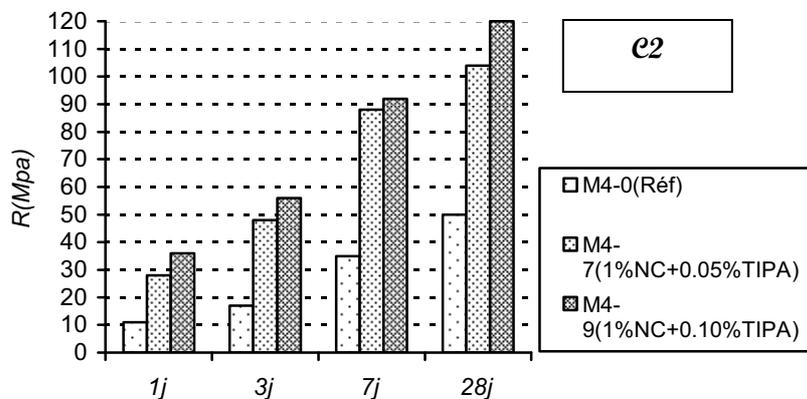


Figure 6.51: Effet de NC combiné à TIPA sous l'effet de NC+TIPA - Mélanges M4-7 & M4-9

La résistance mécanique de la pâte pure de ciment de C2 (M4-7) est améliorée d'environ 155% à 1jour, 180% à 3jours, 150% à 7jours et 105% à 28 jours avec l'ajout de 1%NC+0.05% TIPA par rapport au mélange de référence.

L'ajout de 1%NC avec 0.10% TIPA (M4-9) conduit à une amélioration encore meilleure de cette résistance qui augmente d'environ 225% à 1jour, 230% à 3 jours, 160% à 7 jours et de 140% à 28 jours.

b- Mélanges C2- fumée de silice (FS)

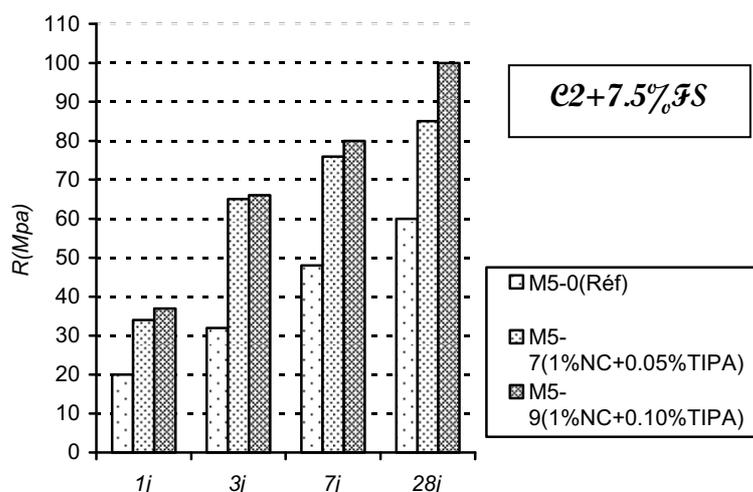


Figure 6.52: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M5-7 & M5-9

L'ajout de 1%NC+0.05% TIPA ou 1%NC+0.1% TIPA aux mélanges à base de C2 et de 7.5% de FS (figure 6.52) conduit à une amélioration des résistances mécaniques d'environ 70 à 85% à 1jour, 100% à 3jours, 60% à 7jours et 30 à 40% à 28 jours comparativement aux résistances du mélange de référence.

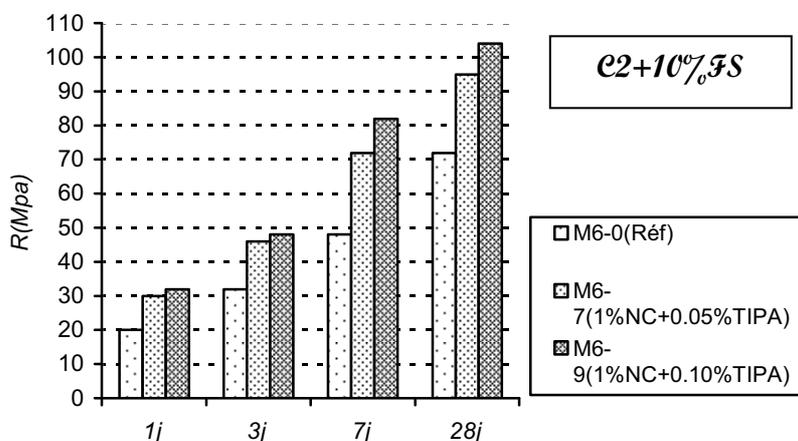


Figure 6.53: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M6-7 & M6-9

Par contre l'introduction des mêmes combinaisons d'adjuvant dans le mélange à base de C2 et de 10% de FS conduit à améliorer la résistance mécanique globalement de l'ordre de 50 à 60% à 1jour, 45% à 3jours, 50 à 70% à 7jours et 30% à 28 jours.

c- Mélanges C2-HS

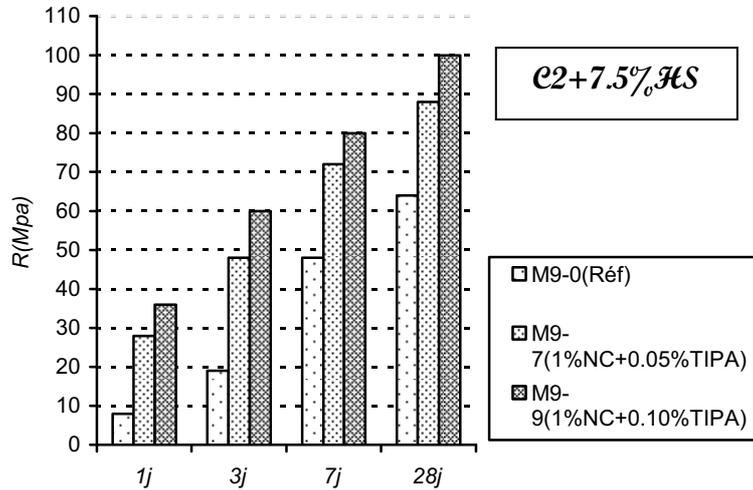


Figure 6.54: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélange M9-7 & M9-9

Dans les mélange à 7.5% de sable HS l'introduction de 1%NC et de 0.05% TIPA (M9-7) permet d'améliorer la résistance mécanique d'environ 250% à 1jour, 150% à 3jours, 50% à 7jours et 40% à 28 jours par rapport au mélange de référence. Si l'on double le taux de la TIPA dans la combinaison d'adjuvant la résistance mécanique à très courtes échéances est considérablement amélioré et atteint une amélioration de 350% à 1jour et 215% à 3 jours par rapport au mélange de référence. Celles à 7 et 28 jours ont une amélioration similaire à celle du mélange précédent à 0.05% TIPA soit respectivement 65 et 55%.

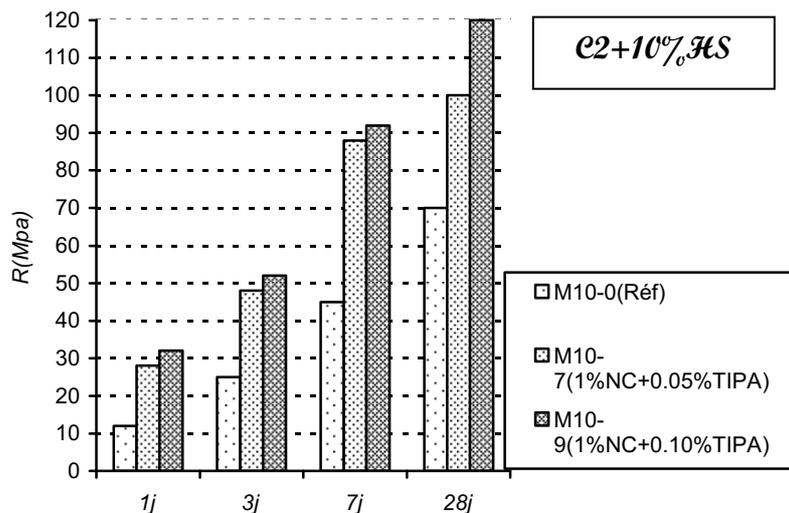


Figure 6.55 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M10-7 & M10-9

Dans le mélange à 10% de sable HS l'ajout de la combinaison de 1%NC+0.05% TIPA (M10-7) conduit à améliorer la résistance mécanique d'environ 130% à 1jour, 90% à 3jours, 95% à 7jours et 45% à 28 jours. Celle de 1%NC+0.10% TIPA (M10-9) permet d'améliorer encore un peu plus la résistance mécanique dont l'augmentation atteint 165% à 1jour, 105% à 3 et 7 jours et de 70% à 28 jours par rapport à celle du mélange de référence.

d- Mélange C2-SS

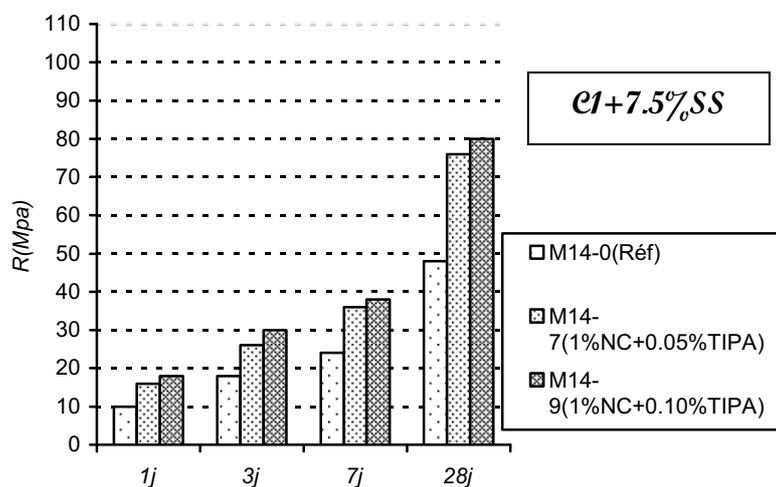


Figure 6.56 : Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélange M14-7 & M14-9

L'ajout de l'une ou l'autre des deux combinaisons d'adjuvant dans les mélanges avec 7.5% sable SS (figure 6.56), conduit à une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 60 à 80% à 1jour, 40% à 3jours, 50 à 60% à 7jours et 60% à 28 jours par rapport à M14-0.

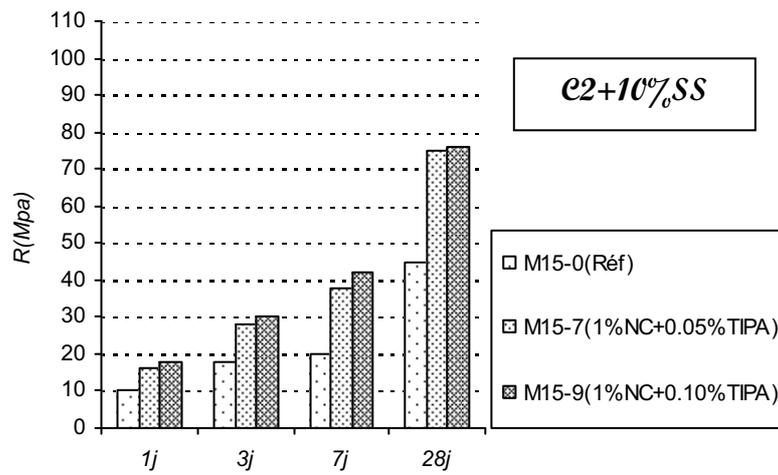


Figure 6.57: Effet de NC combiné à TIPA sur l'évolution des résistances - Mélanges M15-7 & M15-9

Pour le mélange avec 10% de sable SS l'addition de 1%NC+0.05% TIPA (M15-7) ou 1%NC+0.10% TIPA (M15-9) conduit à une amélioration de la résistance mécanique de 60 à 80% à 1jour, 55 à 65% à 3jours, 90 à 110% à 7jours et 70% à 28 jours par rapport à M15-0.

e- Récapitulatif des résultats obtenus

		Mélanges						
		C2*	C2-1*	C2-2*	C2-3*	C2-4*	C2-5*	C2-6*
		(M4) (100%C2)	(M5) (C2-7.5%FS)	(M6) (C2-10%FS)	(M9) (C2-7.5%HS)	(M10) (C2-10%HS)	(M14) (C2-7.5%SS)	(M15) (C2-10%SS)
R1 (Mpa)	Réf	11	20	20	8	12	10	10
	1%NC+0.05%TIPA	28	34	30	28	28	16	16
	% / Réf	2.54	1.70	1.50	<u>3.50</u>	2.33	1.60	1.60
	1%NC+0.10%TIPA	36	37	32	36	32	18	18
	% / Réf	<u>3.27</u>	1.85	1.60	<u>4.50</u>	2.67	1.80	1.80
R3 (Mpa)	Réf	17	32	32	19	25	18	18
	1%NC+0.05%TIPA	48	65	46	48	48	25	28
	% / Réf	2.82	2.03	1.44	2.53	1.92	1.39	1.56
	1%NC+0.10%TIPA	56	66	48	60	52	30	30
	% / Réf	<u>3.29</u>	2.06	1.50	<u>3.16</u>	2.08	1.67	1.67
R7 (Mpa)	Réf	35	48	48	48	45	24	20
	1%NC+0.05%TIPA	88	76	72	72	88	36	38
	% / Réf	2.51	1.58	1.50	1.50	1.96	1.50	1.90
	1%NC+0.10%TIPA	92	80	82	80	92	38	42
	% / Réf	2.63	1.67	1.71	1.67	2.04	1.58	2.10
R28 (Mpa)	Réf	50	60	72	64	70	48	45
	1%NC+0.05%TIPA	104	85	95	88	100	76	75
	% / Réf	2.08	1.42	1.32	1.38	1.43	1.58	1.67
	1%NC+0.10%TIPA	120	100	104	100	120	80	76
	% / Réf	2.40	1.67	1.44	1.56	1.71	1.67	1.69

Tableau 6.8: Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC+TIPA

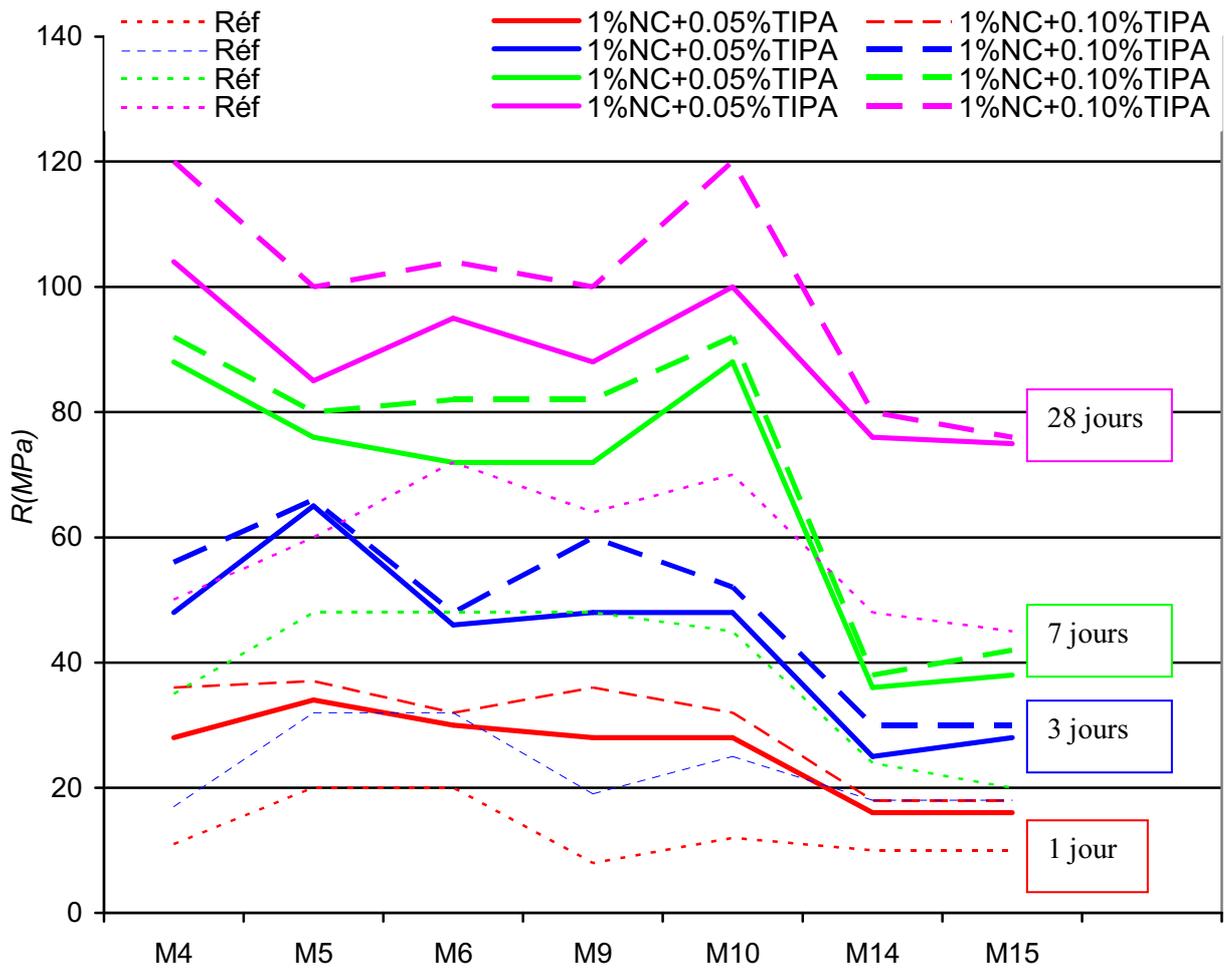


Figure 6.58 : Synthèse des résistances mécaniques à la compression simple des mélange à base de ciment C2 sous l'effet de NC+TIPA

Les résistances mécaniques de tous les mélanges sont très largement augmentées à toutes les échéances.

A très court terme (1 jour), les résistances mécaniques sont facilement doublées ou triplées notamment pour le mélange de base C2 et le mélange HS. Cette augmentation importante se confirme à moyen terme (3 et 7 jours).

A 28 jours, les résistances sont encore largement supérieures à celles des mélanges de référence de plus de 50%. Le doublement du dosage en TIPA améliore les résistances de 5 à 15% sur tous les mélanges.

6.3 Conclusion

Le nitrate de calcium est un accélérateur de prise qui conduit à une amélioration de la résistance en compression au bout de 24 heures. Toutefois à plus long terme l'augmentation de cette résistance est trop faible pour qu'il soit considéré comme un accélérateur de durcissement. L'ajout de TEA ou de TIPA permet par contre une augmentation sensible des résistances à plus long terme.

Tous les mélanges comportant la combinaison de NC et TEA aux dosages étudiés montrent une diminution des temps de prise de l'ordre de 30% en moyenne. Le fait de doubler le dosage en triéthanolamine ne se traduit que par une faible augmentation de la réduction du temps de prise d'environ 10%.

Les résultats obtenus sur les mélanges renfermant les combinaisons NC et TEA sont aussi valables sur les mélanges comportant les combinaisons NC et TIPA. Les temps de prise sont fortement réduits, de l'ordre de 50 à 70%, sur tous les mélanges. La même remarque s'applique en ce qui concerne le doublement du dosage en TIPA.

Les mélanges comportant les combinaisons de NC et/ou TEA et TIPA donnent lieu à des augmentations parfois considérables notamment à court terme de tous les mélanges étudiés. L'utilisation de TIPA semble plus performant que le TEA. Les effets se manifestent également davantage sur les mélanges à base de ciment C2 par rapport à ceux à base de ciment C1.

Les alcanolamines TEA et TIPA utilisées avec des dosages de 0.05% et 0.10% [57,58] ralentissent dans toutes les premières heures la vitesse d'hydratation mais contribuent rapidement par la suite à l'amélioration de la résistance en compression pour tous les mélanges.

La combinaison des deux réactifs, nitrate de calcium et alcanolamines permet de conjuguer leurs effets dans le temps et se traduit d'une part par une réduction des temps de début et fin de prise et d'autre part par une amélioration considérable des résistances mécaniques à toutes les échéances [57,58].

A très court terme le nitrate de calcium joue son rôle d'accélérateur de prise, puis l'alcanolamine (TEA ou TIPA) prend le relais en accélérant notablement la phase de durcissement, conduisant à des résistances mécaniques quasiment doublées notamment à brève échéance. Les effets sont davantage marqués pour les mélanges à base de ciment C2 qui contiennent une concentration élevée en alumino-ferrites.

CHAPITRE 7 : MESURE DE LA CHALEUR D'HYDRATATION DES MELANGES DE BASE AVEC ADJUVANTS

Dans ce chapitre nous, nous intéressons à l'étude de l'hydratation des pâtes de ciment par la méthode de la mesure de la chaleur d'hydratation et du flux thermique. Pour cela nous avons choisi la méthode de la calorimétrie semi-adiabatique. Les résultats sont obtenus jusqu'à l'échéance de 4 jours pour nous permettre de bien voir le processus d'hydratation au jeune âge.

Pour cela nous nous sommes limités à l'utilisation du nitrate de calcium avec le ratio de 1% et à la triéthanolamine avec la teneur de 0.05% du poids de ciment ainsi qu'à leur combinaison.

L'étude de l'hydratation des pâtes de ciment et la mesure de l'évolution de leur température pendant la prise et le début de leur durcissement ont été appréciées au moyen de cet essai. Nous avons employé la méthode de la calorimétrie semi-adiabatique pour les pâtes pures selon la norme française NFP 15-436. Ces essais ont été effectués sur la pâte pure à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. La chaleur dégagée par la pâte de ciment lors de l'hydratation se traduit par une élévation de température importante à partir de laquelle on peut déduire la quantité de chaleur développée.

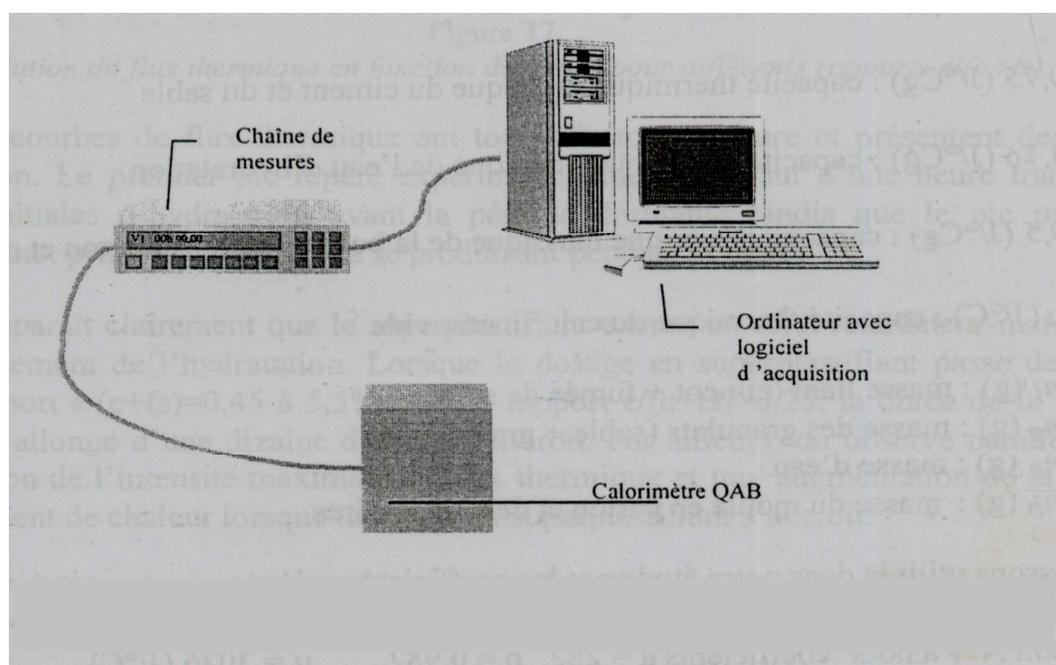


Figure 7.1 : Dispositif expérimental de la calorimétrie

Les essais calorimétriques ont été réalisés uniquement pour les différents mélanges fabriqués avec les ciments de base C1 et C2 pour lesquels les effets des adjuvants sont les plus marqués.

Chapitre 7

L'objectif est de confronter les résultats des essais mécaniques en compression et des essais de prise avec les mesures de chaleur d'hydratation pour ces mélanges. Et de s'assurer de la convergence de l'effet des réactifs ajoutés aux ciments.

7.1 CALCUL DE LA CHALEUR D'HYDRATATION

L'expression de la chaleur d'hydratation à l'instant t s'écrit :

$$q(t) = \frac{C}{m_c} \Delta\theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \Delta\theta . dt \quad (6.1)$$

Avec

- m_c (g) : la masse de ciment contenu dans l'éprouvette,
 t (h) : la durée de l'hydratation,
 C (J.h⁻¹. °C⁻¹) : la capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette,
 α (J.h⁻¹. °C⁻¹) : le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre,
 Θ (°C) : l'échauffement de l'éprouvette, à l'instant t.

Le premier terme représente la chaleur accumulée dans le calorimètre, le second la chaleur dissipée vers le milieu extérieur (chaleur rapportée a 1g de ciment)

1) Calcul de la chaleur cumulée dans le calorimètre au temps t :

Dans le calcul de ce premier terme de l'équation la chaleur «C» représente la capacité thermique totale du calorimètre, θ l'échauffement de l'éprouvette de mortier à l'instant t, et m la masse de ciment contenu dans l'éprouvette,

Pour déterminer la capacité thermique totale de du calorimètre «C» nous utilisons la relation suivante :

$$C = 0.75(m_c + m_s) + 3.76m_e + 0.50m_b + \mu \quad (6.2)$$

μ (J°C⁻¹) étant la capacité thermique du calorimètre vide,

Nous prenons :

0.75 (J°C⁻¹g⁻¹) pour la capacité thermique massique du ciment et du sable,

3.76 (J°C⁻¹g⁻¹) pour la capacité thermique massique moyenne de l'eau,

0.50 (J°C⁻¹g⁻¹) pour la capacité thermique massique de la boite à mortier,

m_s, m_e, m_b , étant respectivement les masses du sable, de l'eau et de la boite à mortier vide.

2) Calcul de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant

L'expression de α est donnée après étalonnage des calorimètres par l'expression:

$$\alpha = a + b.\theta$$

Le calcul des déperditions s'effectue par la méthode des trapèzes. La période d'hydratation est décomposée en n intervalles représentés par des intervalles de temps s'écoulant entre deux relevés successifs de l'échauffement de l'éprouvette.

La chaleur dissipée par gramme de ciment vers le milieu ambiant extérieur pendant la période d'hydratation s'écrit :

$$\frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n \alpha_{i,moy} . \theta_{i,moy} . \Delta t_i$$

Avec :

Δt_i = temps (h) écoulé entre la mesure de l'échauffement à l'instant i et la mesure précédente à l'instant $i-1$

$\theta_{i,moy}$ = échauffement moyen (°C) dans l'intervalle considéré,

$\alpha_{i,moy} = a + b.\theta_{i,moy}$ = coefficient moyen de déperdition thermique totale du calorimètre dans ce même intervalle.

3) Mesure de la quantité de chaleur dégagée par la pâte de ciment

Le banc de mesure comporte deux calorimètres semi adiabatiques dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesure multivoies à microprocesseur permettant de mémoriser les températures en cours d'essai (Figure 2.3). Un logiciel installé sur un micro-ordinateur permet de transférer l'intégralité des informations des essais. Il suffit d'introduire les constantes du calorimètre ainsi que les masses respectives de chaque composant introduit dans le vase et le logiciel détermine d'une manière systématique la quantité de chaleur dégagée par gramme de ciment. On obtient ainsi les courbes d'échauffement et la chaleur d'hydratation en fonction du temps.



Figure 7.2 Dispositif expérimental de mesure de la quantité de chaleur

7.2 ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

7.2.1 Résultats en terme de températures

Nous présentons sur les figures 8.1 et 8.2. les résultats de l'évolution de la température en fonction du temps lors de l'hydratation des différents mélanges (M_{ij}) à base respectivement du ciment C1 (mélanges M_{1j}) et du ciment C2 (mélanges M_{4j}).

Nous rappelons que les mélanges M_{i-0} sont des mélanges de pâtes pures sans aucun ajout d'adjuvant (mélanges de référence), les mélanges M_{i-1} sont des mélanges de pâte de ciment dans lesquels 1% de NC est introduit, les M_{i-2} sont des mélanges avec 0,05% de TEA et enfin les M_{i-3} sont des mélanges avec 1% de NC et 0,05% de TEA.

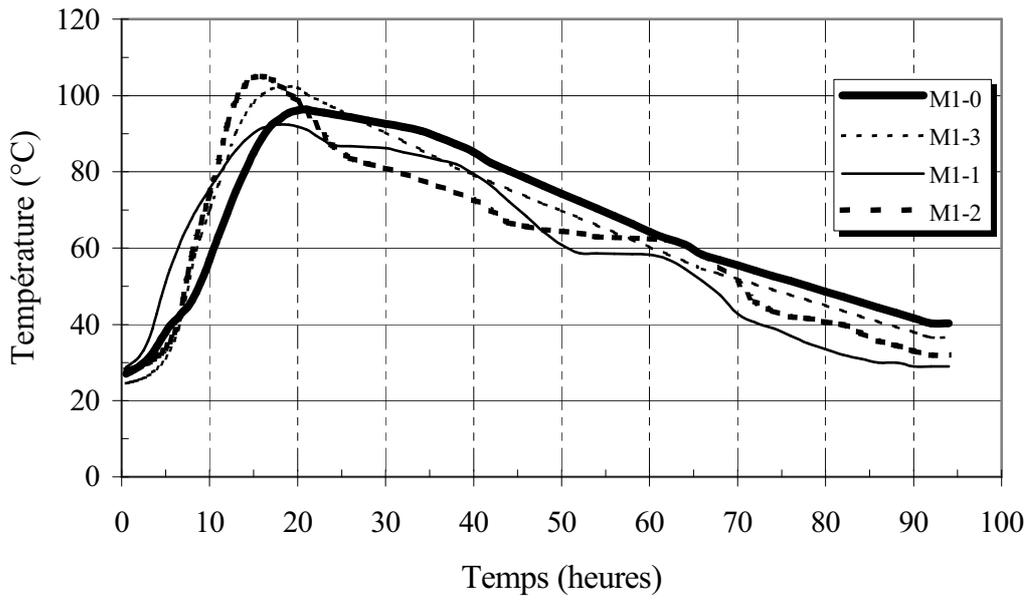


Figure 7.3 (a). Evolution de la température en fonction du temps (Ciment C1)

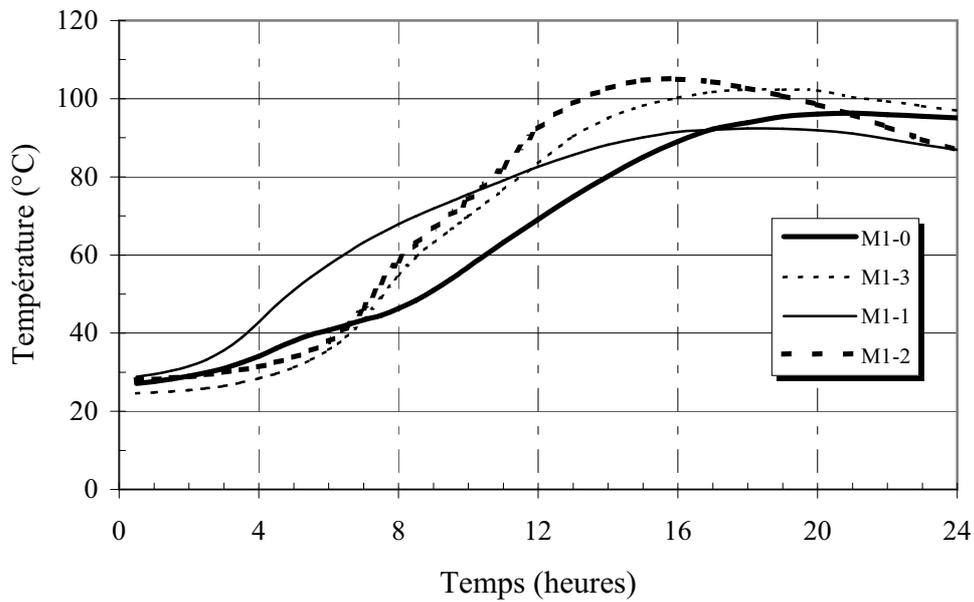


Figure 7.3 (b). Evolution de la température en fonction du temps pendant 24 heures (Ciment C1).

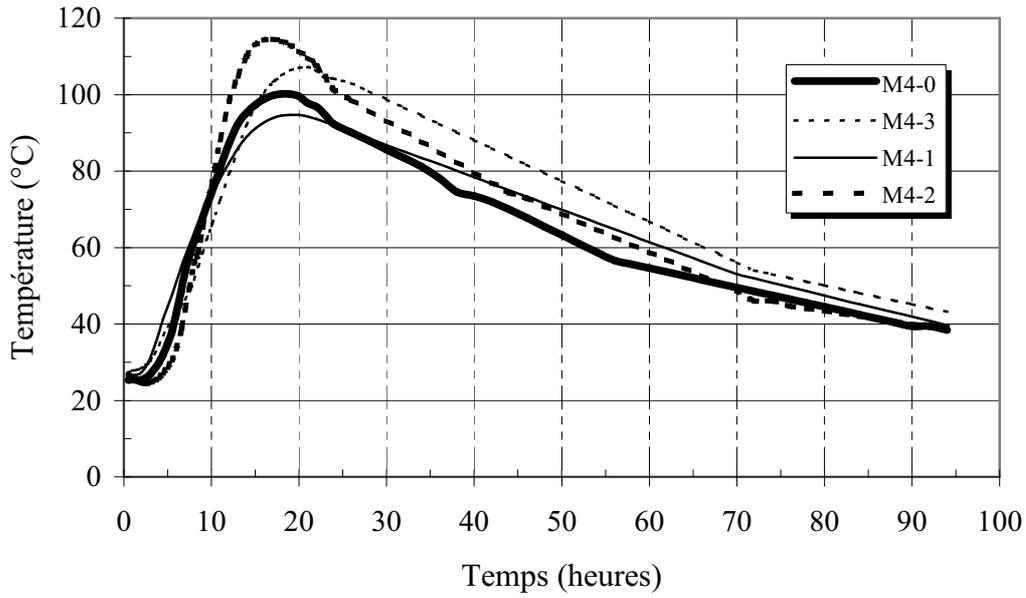


Figure 7.4 (a). Evolution de la température en fonction du temps (Ciment C2).

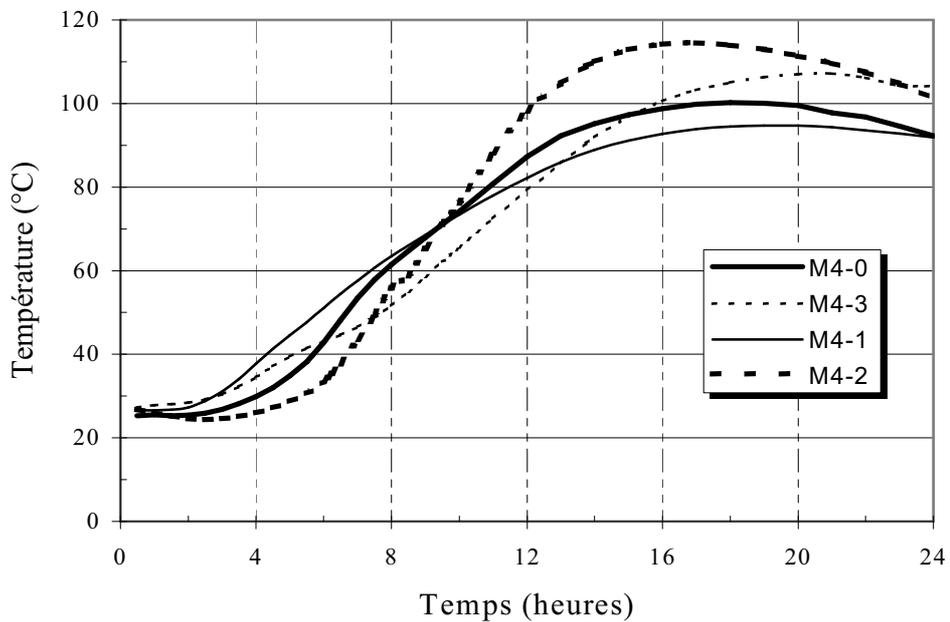


Figure 7.4 (b). Evolution de la température en fonction du temps pendant 24 heures (Ciment C2).

Les courbes des figures 7.3 (a) et 7.4 (a) présentent toutes la même allure mais avec des vitesses différentes confirmant ainsi les résultats en terme de durée de prise présentés dans les chapitres 4, 5 et 6. En effet, au très jeune âge les courbes des mélanges Mi-1 (fig.7.3b et 7.4b) et Mi-3 (fig.7.4b) sont décalées vers la gauche par rapport à celles des mélanges de référence Mi-0, traduisant ainsi une réaction d'hydratation plus précoce pour ces compositions que les mélanges de référence. A l'inverse les courbes des mélanges Mi-2 sont décalées vers la droite par rapport aux courbes de référence indiquant un retard de la réaction d'hydratation. Ce phénomène est plus marqué dans le cas du ciment C2 [56].

L'examen des courbes de la figure 7.4 (b) notamment, permet de montrer l'effet combiné des deux ajouts, nitrate de calcium et triéthanolamine. En effet, dans les premières heures, le nitrate de calcium joue son rôle d'accélérateur de prise en augmentant la vitesse d'hydratation si bien que les courbes Mi-1 sont au dessus des courbes de référence Mi-0. Dans un deuxième stade, la triéthanolamine prend le relais en ralentissant la vitesse d'hydratation, les courbes Mi-3 passent alors au-dessous des courbes de référence pour repasser au delà de 16 heures à nouveau au-dessus des courbes de référence, traduisant ainsi une activation des réactions avec un degré d'hydratation plus élevé à long terme.

La triéthanolamine est semble-t-il, d'après Gartner (Gartner *et al*, 93), adsorbée par les grains de ciment avant que ne se développe le mécanisme d'accélération du transport des ions ferriques à travers la phase aqueuse sous la forme de complexes alcanolamines ferriques.

7.2.2 Résultats en terme de chaleur d'hydratation

Les figures 7.5 et 7.6 représentent la chaleur dégagée en fonction du temps des mélanges à base des ciments C1 et C2 pour les différentes combinaisons d'adjuvants et viennent confirmer les résultats précédents.

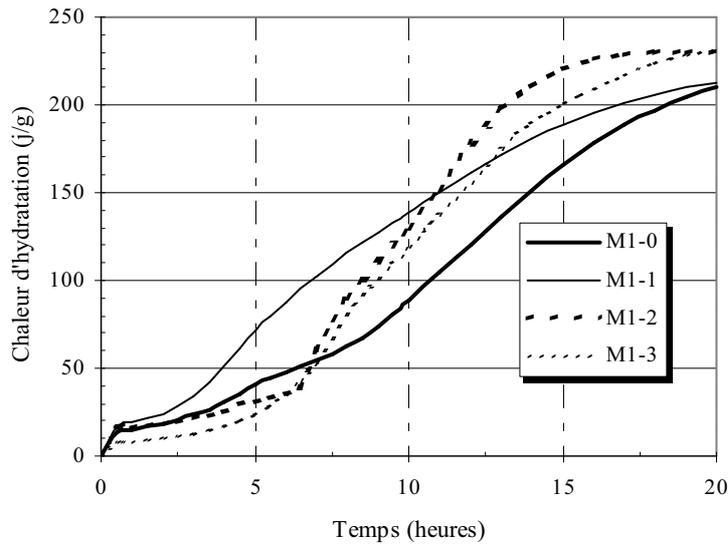


Figure 7.5 : Evolution de la chaleur dégagée pendant 24 heures d'hydratation (Ciment C1)

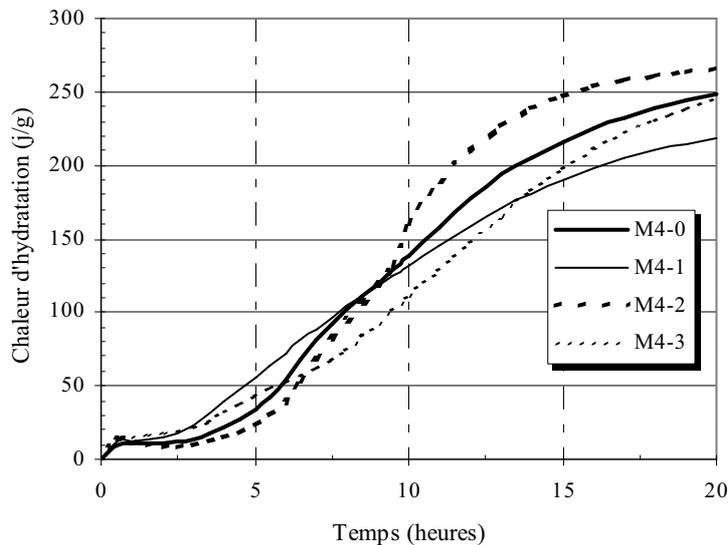


Figure 7.6 : Evolution de la chaleur dégagée pendant 24 heures d'hydratation (Ciment C2)

Les courbes 7.5 et 7.6 confirment les résultats obtenus avec les essais de prise et de résistances mécaniques. Elles montrent que l'ajout d'adjuvant accélère les réactions d'hydratation dès le début. L'effet accélérateur de prise est très visible avec le nitrate de calcium au début de la réaction d'hydratation (Mi1 des figures 7.5 et 7.6). Celui-ci fait augmenter la chaleur d'hydratation aux premières heures puis la triéthanolamine prend le relais en réduisant la vitesse d'hydratation tout en augmentant la quantité de chaleur dégagée (Mi2).

Ces courbes confirment, une fois de plus les résultats des essais de prise et de résistances mécaniques présentés dans les chapitres précédents (chapitres 4, 5 et 6). Elles montrent que l'effet

accélérateur est d'autant plus grand que les deux effets sont combinés et ceci dès les premières heures (courbes Mi3) [56].

7.3 CONCLUSION

L'étude de l'hydratation des pâtes de ciment et la mesure de l'évolution de leur température pendant la prise et le début de leur durcissement ont été appréciées au moyen d'essais calorimétriques. La chaleur dégagée par la pâte de ciment lors de l'hydratation se traduit par une élévation de température importante à partir de laquelle on peut déduire la quantité de chaleur développée. (on remarque que la température dépasse les 100°C au-delà de 16 heures, à cet instant on suppose que toute la réaction d'hydratation s'est déjà produite et la quantité d'eau restante s'est évaporée)

Les courbes obtenues confirment les résultats en terme de durée de prise et en terme de résistances mécaniques en compression, présentés dans les chapitres précédents.

L'examen des courbes des différentes figures a permis de montrer l'effet combiné des deux ajouts, nitrate de calcium et triéthanolamine. En effet, dans les premières heures, le nitrate de calcium joue son rôle d'accélérateur de prise en augmentant la vitesse d'hydratation. Dans un deuxième stade, la triéthanolamine prend le relais en accélérant notablement la phase de durcissement (au delà de 16 heures), traduisant ainsi une activation des réactions avec un degré d'hydratation plus élevé à long terme.

La triéthanolamine est semble-t-il, d'après Gartner et al [50], adsorbée par les grains de ciment avant que ne se développe le mécanisme d'accélération du transport des ions ferriques à travers la phase aqueuse sous la forme de complexes alcanolamines ferriques.

CHAPITRE 8 SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS SUR LES RESISTANCES MECANIQUES DES MELANGES AVEC ADJUVANTS.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que le nitrate de calcium permet d'améliorer les temps de début et de fin de prise et n'a globalement pas d'effet sur les résistances mécaniques des mélanges étudiés. Les alcanolamines conduisent, en fonction de leur dosage et du type de ciment utilisé à des améliorations très importantes des résistances mécaniques et n'ont presque pas d'effet sur les temps de prise. En revanche la combinaison des deux types d'adjuvants (nitrate de calcium et alcanolamines) conduit à la fois, à une réduction des temps de prise et à une amélioration très importante des résistances mécaniques notamment de celles des mélanges dans lesquels du sable siliceux du type HS est substitué à une partie du ciment notamment le ciment C2. Ainsi, nous présentons dans ce chapitre, une synthèse des résultats obtenus en terme de résistances mécaniques des mélanges avec adjuvants seuls et avec combinaisons d'adjuvants.

8.1 MELANGES A BASE DE CIMENT C1

a- pâte pure à base de C1

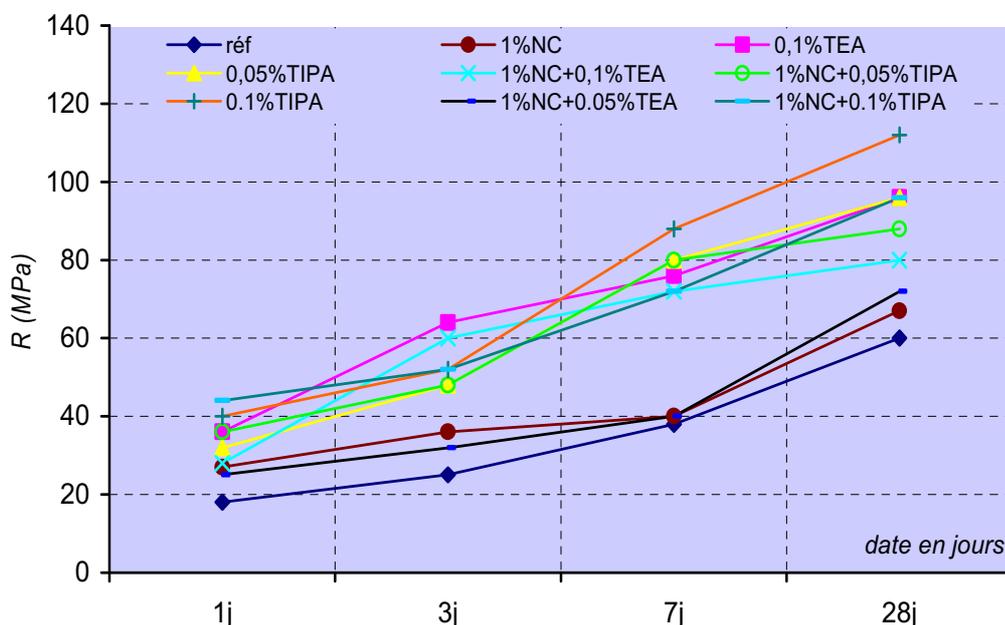


Figure 8.1 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M1 (C1)

La courbe 8.1 montre que l'introduction de 1%NC dans le mélange M1 (pâte pure de ciment C1), ne conduit pas à une augmentation significative de la résistance mécanique en compression au-delà du court terme (1jour), ce qui ne nous permet pas de le considérer comme un accélérateur de durcissement.

A court terme, c'est la courbe 0.1% TEA qui est au-dessus de toutes les autres. L'introduction du TEA engendre une augmentation de résistance mécanique de 100% à 1jour, 150% à 3 jours et 100% à 7jours. Elle conduit donc aux meilleures performances mécaniques.

A plus long terme, c'est les 0.10% TEA et 0.05% TIPA qui conduisent aux meilleures performances mécaniques. Elles présentent des valeurs équivalentes à 28 jours et engendrent une augmentation des résistances mécaniques d'environ 60% par rapport à la valeur de référence.

Par ailleurs, pour les combinaisons des deux réactifs, l'influence de NC est ressentie uniquement sur les temps de prise.

b - Mélanges C1-fumée de silice (FS)

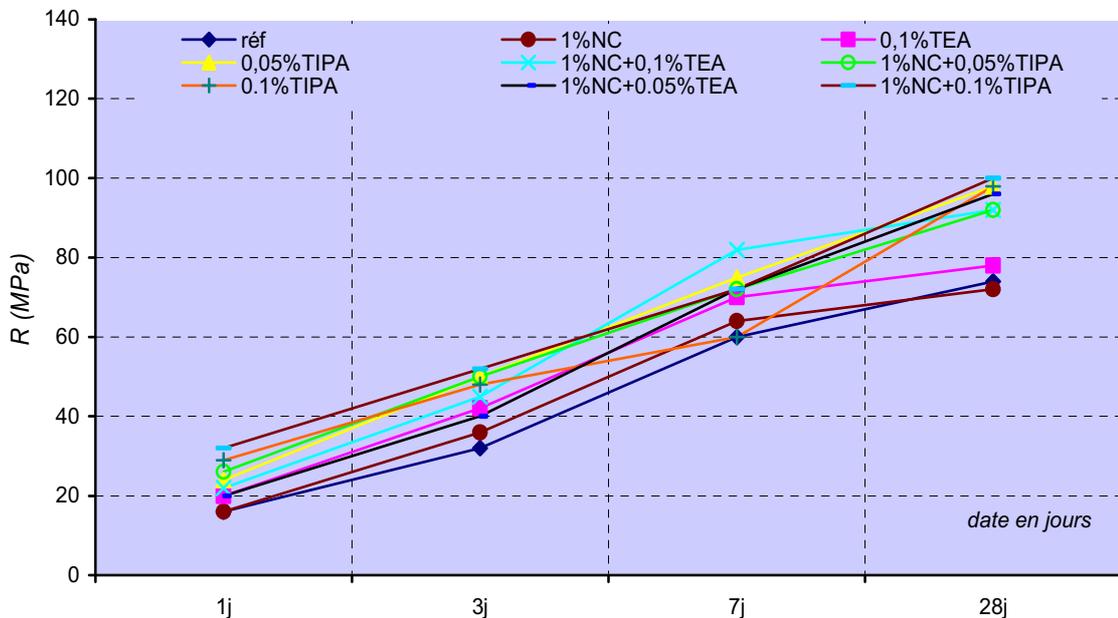


Figure 8.2 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M2 (C1+7.5%FS)

Les courbes de la figure 8.2 montre que l'introduction de 1%NC dans le mélange M2 (C1+7.5%FS) avec fumée de silice, n'a pas d'effet sur la résistance mécanique en compression (l'influence de NC reste incontesté sur les temps de prise).

Par ailleurs, on remarque que les combinaisons les plus performantes à court terme, comme à plus long terme sont 1%NC+0.10%TEA, 1%NC+0.05%TIPA et 0.05% TIPA. Leurs courbes sont presque superposées et se placent au-dessus des autres courbes. Elles conduisent, à court terme à des augmentations de résistances d'environ 20 à 30% par rapport à la référence et d'environ 60% à plus long terme (obtenue avec 0.05% TIPA).

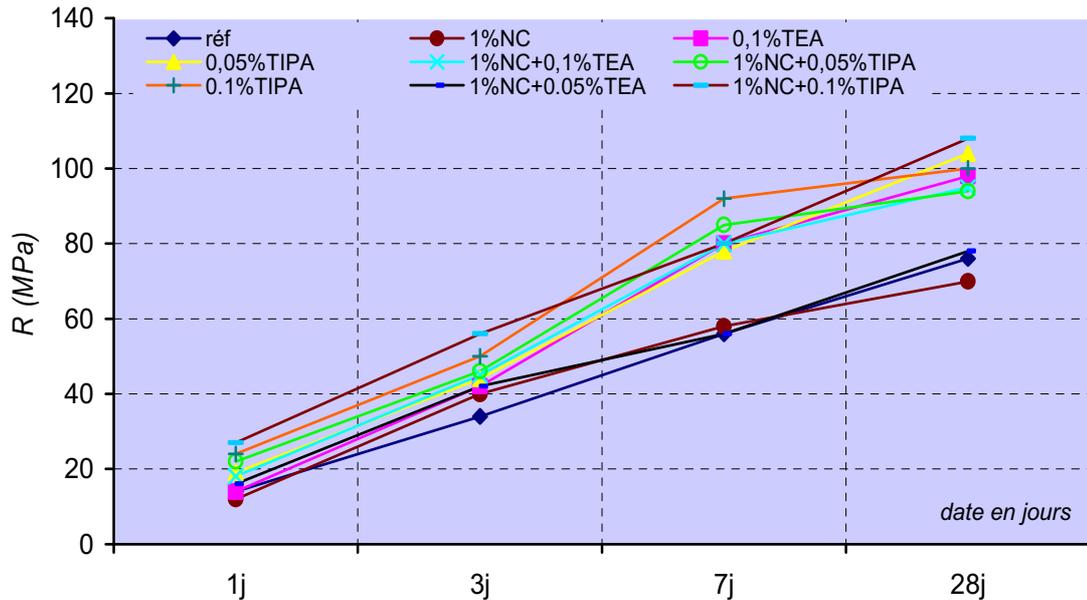


Figure 8.3 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M3 (C1+10%FS)

Dans le cas du mélange C1 avec 10% de FS, la figure 8.3 montre que la combinaison 1%NC+0.05%TIPA donne les meilleures performances mécaniques à court terme et engendre une augmentation de résistance de l'ordre de 35 à 50% par rapport à la référence. Viennent tout de suite après les combinaisons 1%NC+0.05%TEA et 0.05%TIPA engendrant des augmentations de résistances par rapport à la référence de l'ordre de 30 à 35% (entre 1 et 3 jours). C'est la combinaison 0.05%TIPA qui prend le dessus à plus long terme (28 jours) suivie des combinaisons 0.1%TEA et 1%NC+0.05%TIPA.

c- Mélanges C1-HS

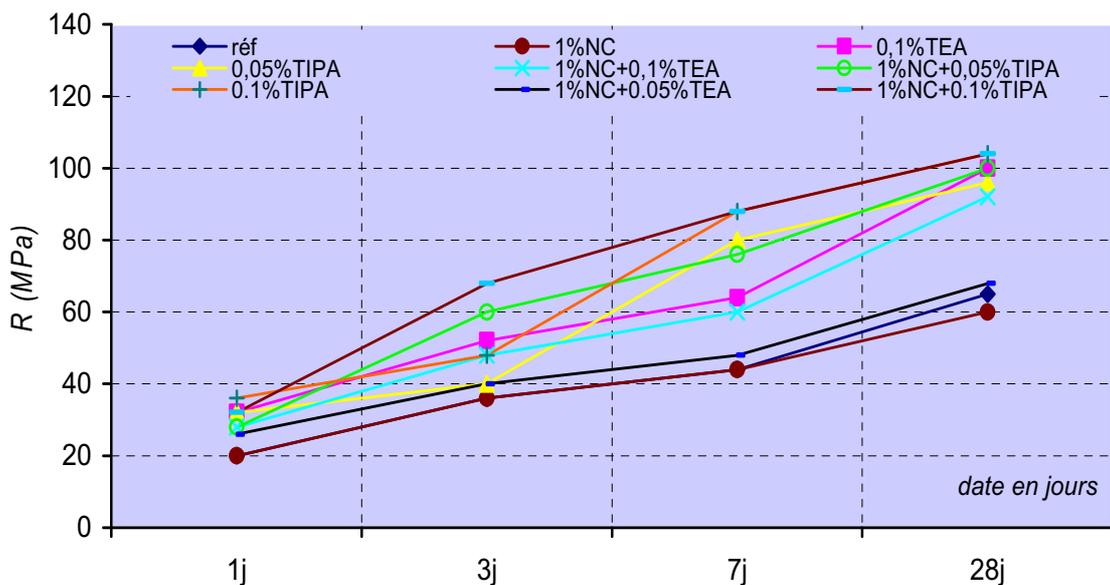


Figure 8.4 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M7 (C1+7.5%HS)

Pour le mélange C1 avec 7.5% de sable HS, la figure 8.4 montre que le nitrate de calcium n'a pas effet sur le développement des résistances mécaniques, la courbe 1% NC et la courbe de référence sont pratiquement superposées.

Les quatre autres combinaisons d'adjuvant conduisent à des résistances mécaniques à 1jour ayant des valeurs très proches. Ces dernières ont été augmentées de 40 à 60% par rapport à la valeur de référence. Ainsi toutes les courbes démarrent pratiquement au même point mais rapidement la courbe 1%NC+0.05%TIPA prend le dessus. Cette combinaison conduit aux meilleures performances mécaniques pratiquement à toutes les échéances. A 28 jours, cette combinaison est rattrapée par les 3 autres (0.10%TEA, 0.05%TIPA et 1%NC+ 0.10% TEA) et conduisent toutes à une augmentation des résistances mécaniques de l'ordre de 40 à 50% par rapport à la référence.

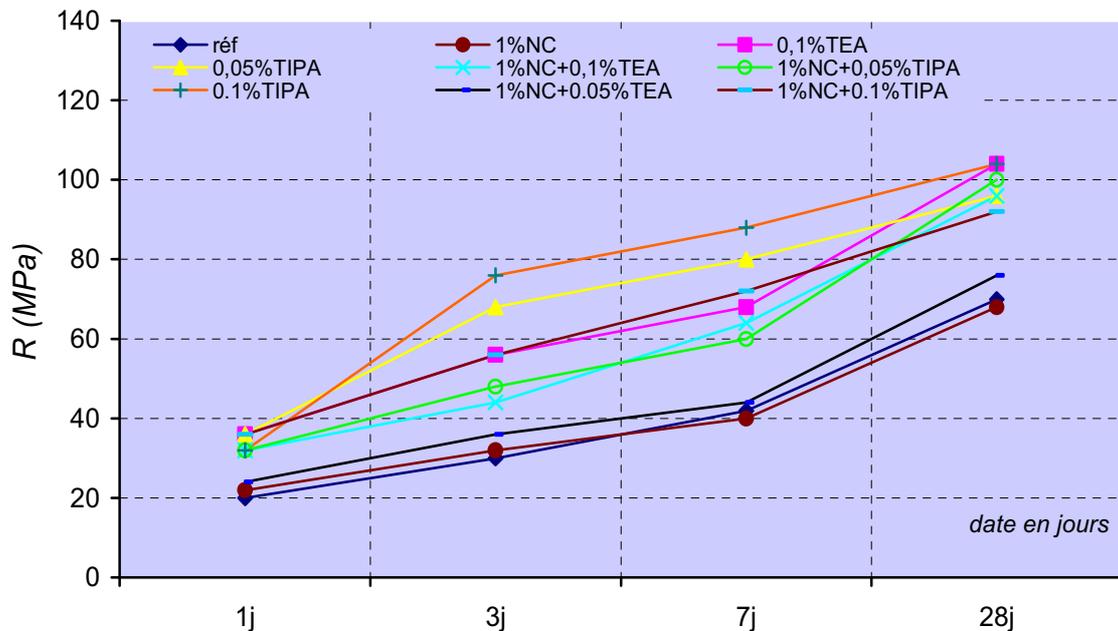


Figure 8.5 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M8 (C1+10%HS)

Dans les mélanges à base de C1 et de 10% de sable HS (figure 8.5), toutes les combinaisons contenant des alcanolamines conduisent à une amélioration de la résistance mécanique à très court terme (1 jours) qui est de l'ordre de 60 à 80% par rapport à la valeur de référence. Au-delà c'est la combinaison avec 0.05%TIPA qui prend le dessus en conduisant à des améliorations de résistances mécaniques à 3 et 7 jours d'environ respectivement de 80 à 120% par rapport à la référence. A 28 jours, toutes les combinaisons alcanolamines conduisent à des valeurs de résistances mécaniques dont les améliorations par rapport à la valeur de référence sont de l'ordre de 40 à 50%.

d- Mélanges C1-SS

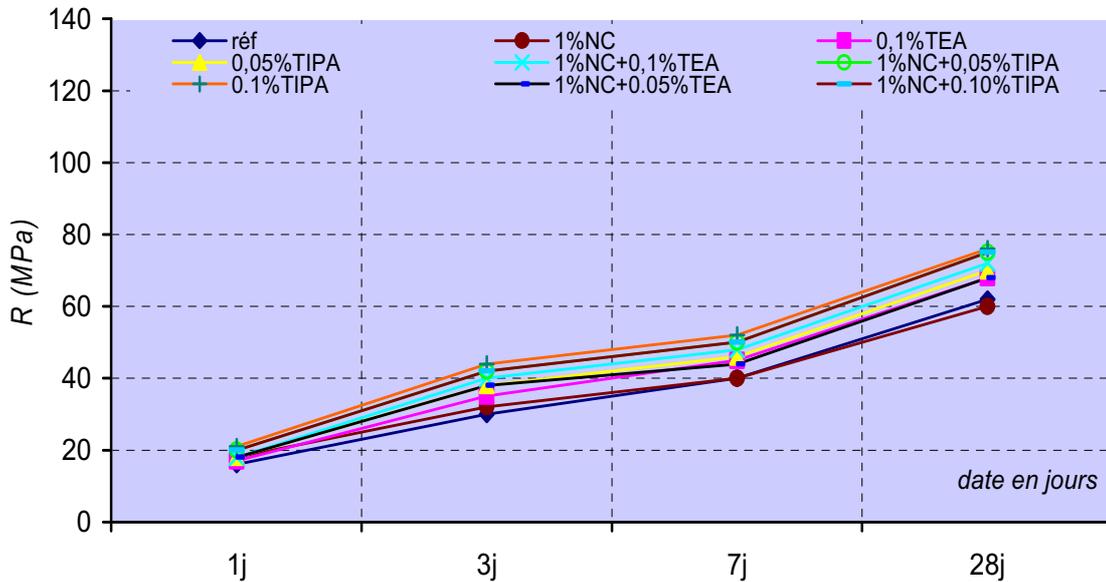


Figure 8.6 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M12 (C1+7.5%SS)

Sur la figure 8.6 on voit bien que toutes les courbes ont pratiquement la même allure et sont presque confondues au démarrage, bien que les courbes des combinaisons 0.1%TIPA et 1%NC+0.10%TIPA sont au dessus de toutes les autres.

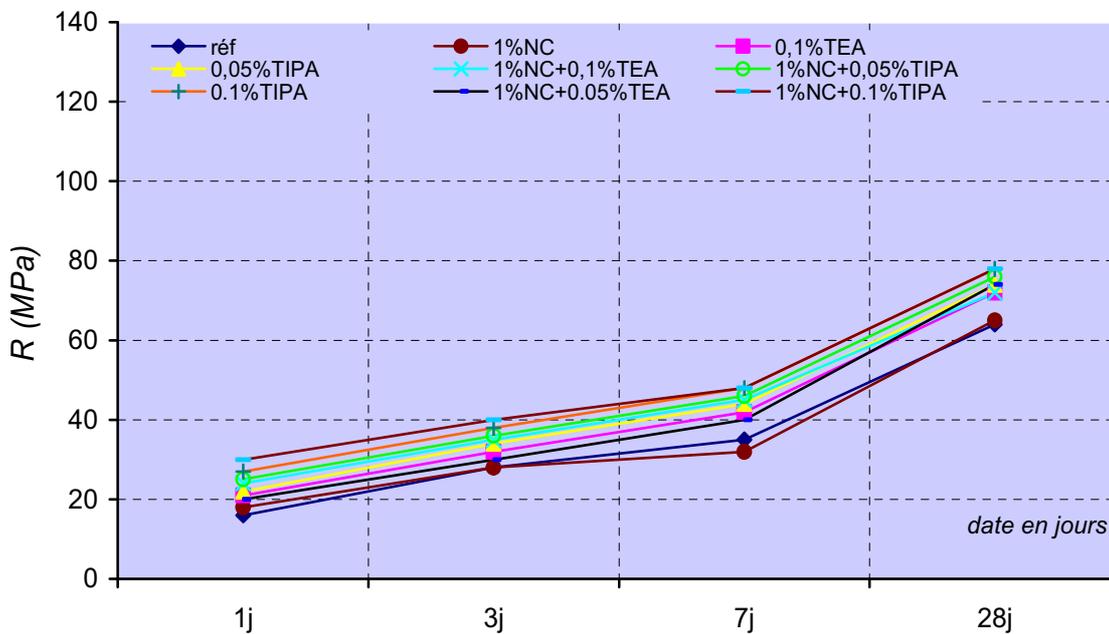


Figure 8.7: Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M13 (C1+10%SS)

Le même phénomène que celui de la figure 8.6 est observé sur la figure 8.7 ou les courbes des combinaisons 1%NC+0.1%TIPA, 0.1%TIPA et 1%NC+0.1%TEA prennent le dessus sur toutes les

autres courbes avec une augmentation de la résistance de l'ordre de 30 à 50% entre 3 et 7 jours et 25 à 80% à 28 jours.

8.2 MELANGES A BASE DE CIMENT C2

a – Pâte pure à base de C2

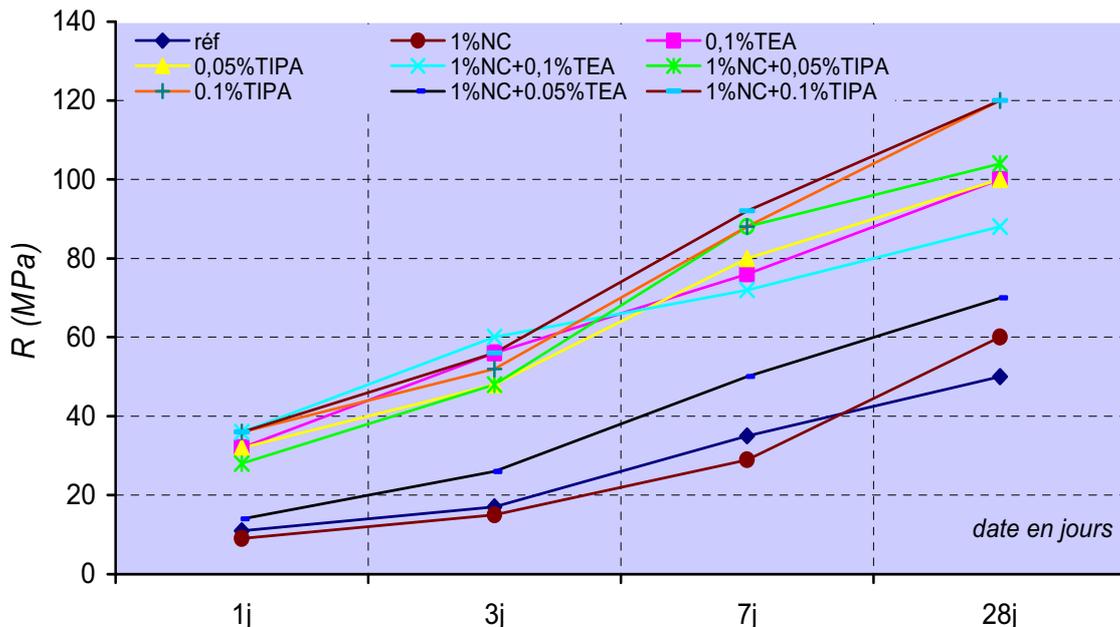


Figure 8.8 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M4 (C2)

De la même façon que pour le ciment C1, l'introduction de 1%NC n'a pas d'effet sur les résistances mécaniques du ciment C2. Pour le reste et à très court terme (1 jour), toutes les combinaisons avec les alcanolamines conduisent à des améliorations des résistances mécaniques. Celle avec 1%NC+0.10%TEA se détache légèrement des autres engendrant des augmentations de la résistance mécanique de l'ordre de 220% à 250% par rapport à la référence respectivement à 1 et 3 jours. A plus long terme, c'est plutôt la combinaison 1%NC+0.05%TIPA qui se détache des autres en conduisant à des améliorations de la résistance mécanique de l'ordre de 100 et 110% par rapport à la référence aux échéances de 7 et 28 jours.

b - Mélanges C2-fumée de silice (FS)

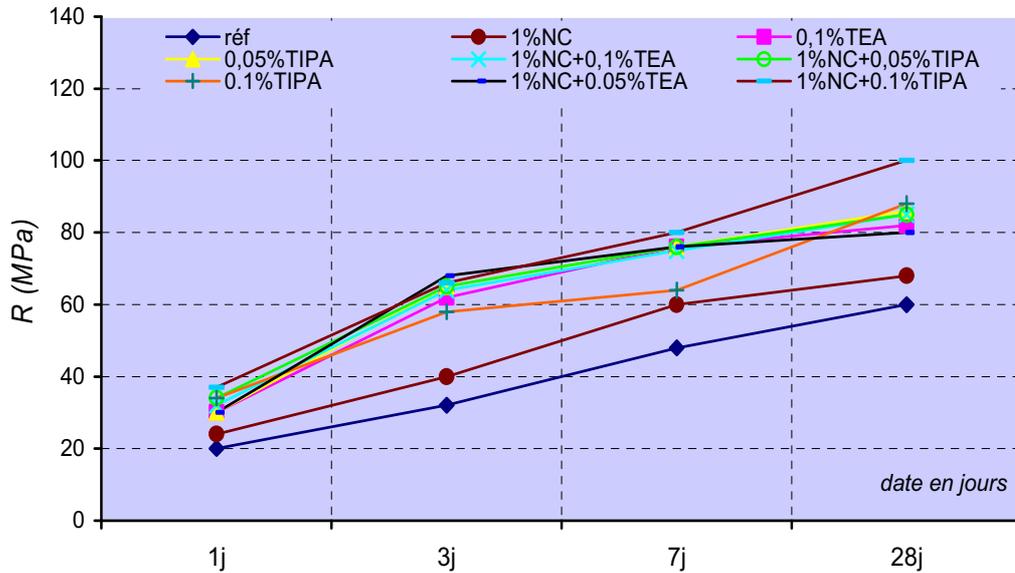


Figure 8.9 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M5 (C2-7.5%FS)

Les courbes de la figure 8.9 montrent que pour les mélanges à base de C2 et de 7.5% FS, les combinaisons alcanolamines contenant ou non du NC conduisent toutes à une amélioration similaire des résistances mécaniques et cela à toutes les échéances. Cette amélioration est de l'ordre de 50 à 60% à 1 jour, 90 à 100% à 3 jours, 55 à 60% à 7 jours et 35 à 40% à 28 jours.

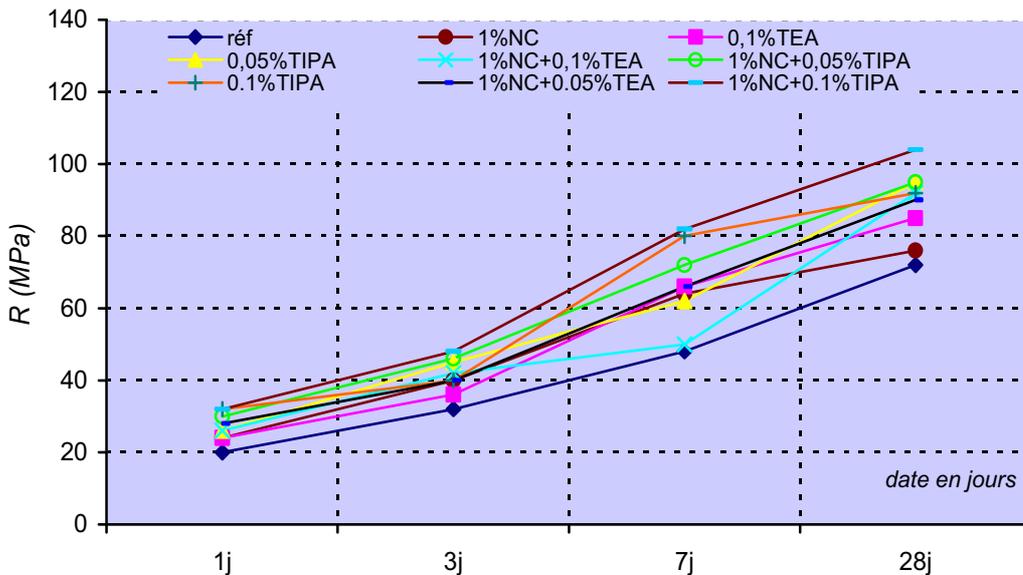


Figure 8.10 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M6 (C2-10%FS)

Tandis que pour les mélanges avec 10% FS, les différentes combinaisons d'adjuvants conduisent à des améliorations plus modérées et moins marquées que celles obtenues dans le cas des mélanges précédents. A noter que la combinaison 1%NC+0.05%TIPA reste légèrement meilleure que toutes les autres.

c- Mélanges C2-HS

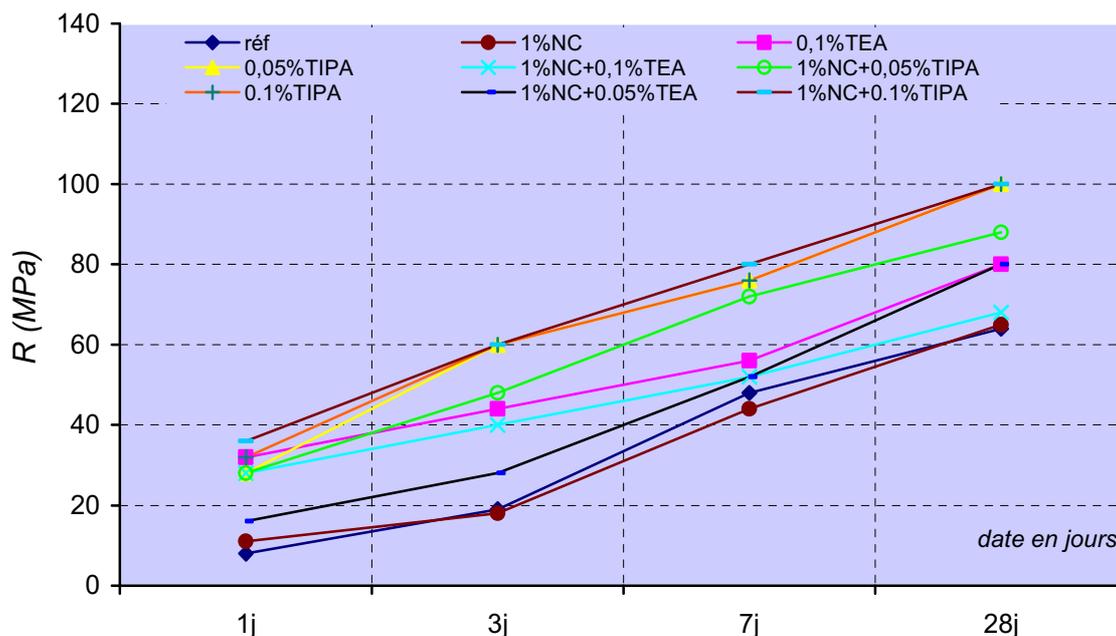


Figure 8.11 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M9 (C2-7.5%HS)

Concernant le mélange C2+7.5%HS, la figure 8.11 montre qu'à très court terme, toutes les combinaisons d'alcanolamines permettent une amélioration considérable de la résistance mécanique, et quantitativement presque la même allant jusqu'à une amélioration de 250% par rapport à la valeur de référence. Au-delà de 1 jour ce sont les combinaisons à base de TIPA qui donnent les meilleures performances mécaniques. Ainsi, on peut noter des augmentations pour la résistance à la compression de l'ordre de 210% à 3 jours et 55% à 7 et 28 jours par rapport à celle obtenue pour le mélange de référence.

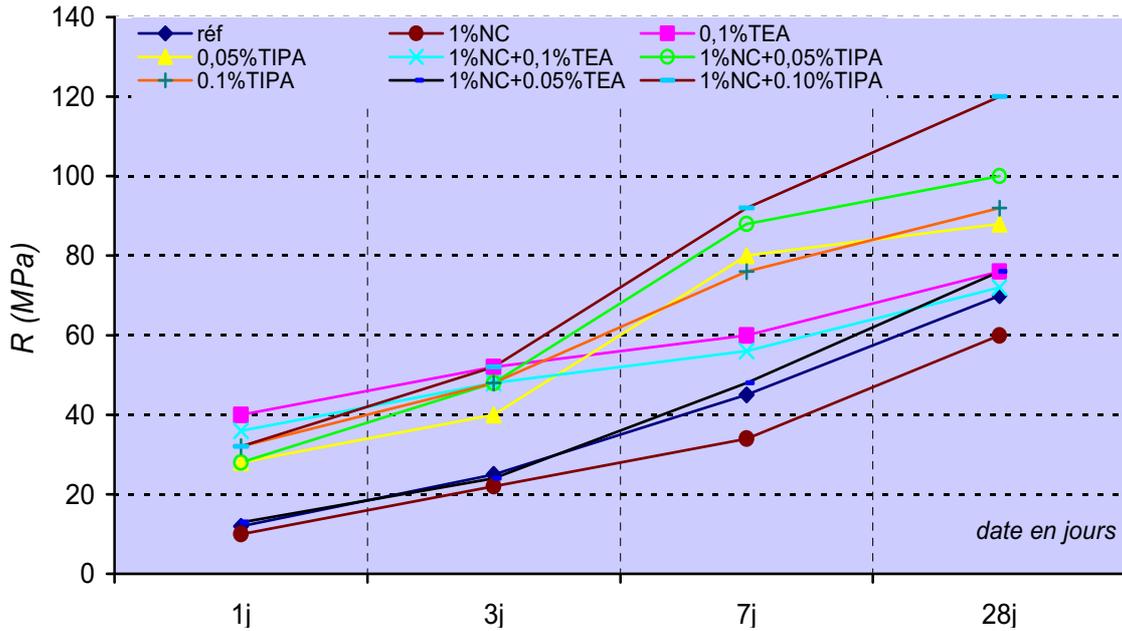


Figure 8.12 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M10 (C2-10%HS)

Dans le cas des mélanges avec 10%HS, la figure 8.12 montre que toutes les combinaisons d'alcanolamines conduisent à des améliorations considérables de la résistance mécanique et cela à toutes les échéances. Néanmoins, il faut noter que celles à base de TEA sont les plus performantes à court terme avec des améliorations de l'ordre de 230% à 1 jour et 100% à 3 jours par rapport à la valeur de référence. Tandis qu'à plus long terme ce sont les combinaisons à base de TIPA qui conduisent aux meilleures performances mécaniques avec des augmentations d'environ 95% à 7 jours et 40% à 28 jours par rapport à la référence.

d- Mélanges C2-SS

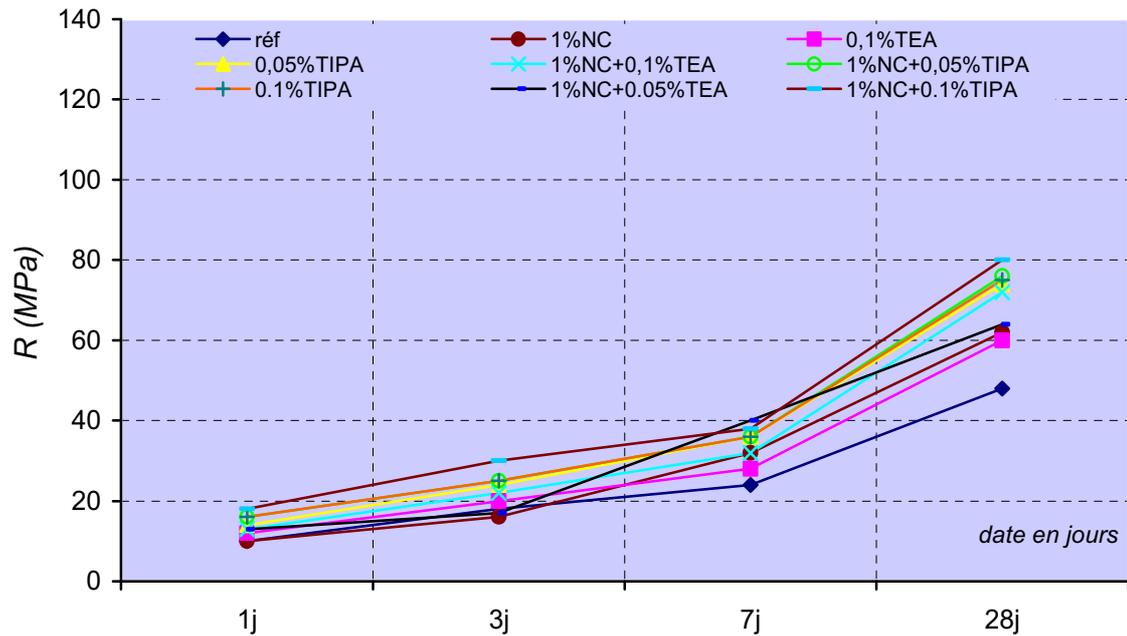


Figure 8.13 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M14 (C2-7.5%SS)

La combinaison 1%NC+0.1%TIPA est la plus performante à toutes les échéances

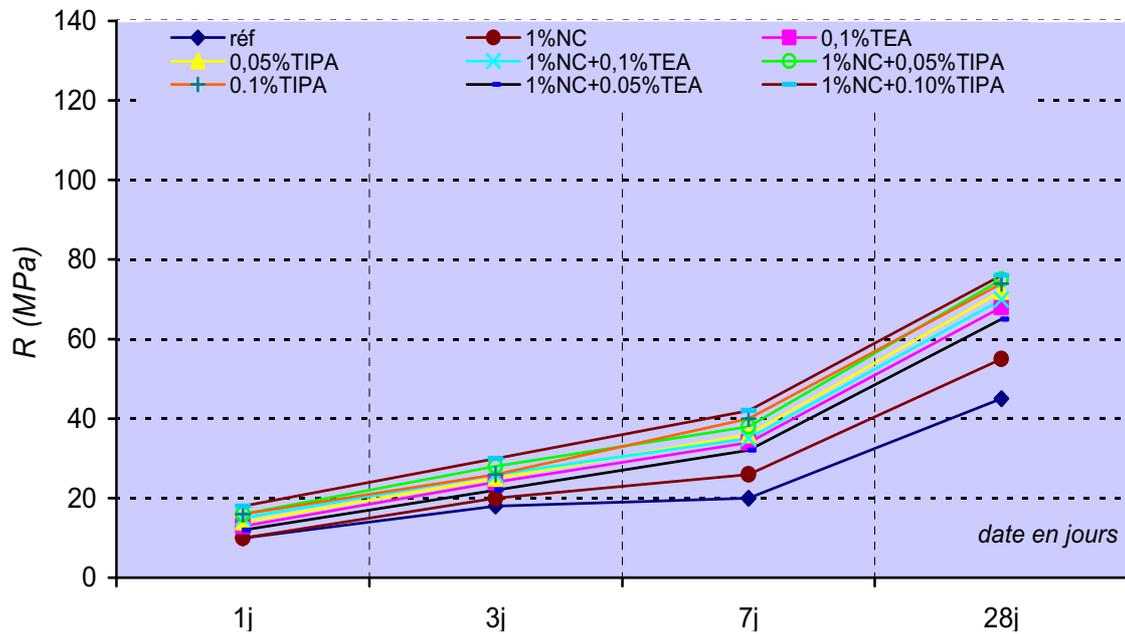


Figure 8.14 : Comparaison des effets des adjuvants sur l'évolution des résistances du mélange M15 (C2-10%SS)

On observe le même phénomène que sur la courbe 8.13 et toutes les courbes ont la même allure

8.3 Conclusion

Le nitrate de calcium est un adjuvant qui joue un rôle d'accélérateur de prise et n'apporte pas d'amélioration significative de la résistance mécanique en compression pour tous les mélanges étudiés.

Les combinaisons 0.1% TEA et 0.05%TIPA dans le ciment pur C1 (M1) sont équivalentes du point de vue résistance mécanique à long terme (28j) en engendrant un accroissement de résistance de l'ordre de 60% par rapport à la référence. A court terme (entre 1 et 7j) les courbes de la combinaison 0.10%TEA sont au dessus de toutes les courbes des autres combinaisons avec une contribution dans l'augmentation des résistances de 100% à 1 et 7 jours et de 150% à 3 jours. Donc pour le ciment pur C1 il est préférable d'utiliser la combinaison 0.1%TEA qui joue à la fois le rôle d'accélérateur de prise et de durcissement.

Concernant le mélange C1+7.5%FS (M2) les courbes des combinaisons performantes 0.05%TIPA et 1%NC+0.05%TIPA sont presque superposables et conduisent à une contribution dans l'augmentation des résistances de l'ordre de 20 à 30% à très court terme (1 à 3j) et d'environ 50à 60% à long terme. Dans ce cas le nitrate de calcium joue son rôle d'accélérateur de prise et provoque une diminution de l'ordre de 5% à long terme ce qui nous conduit à opter pour le choix de la combinaison 1%NC+0.05%TIPA.

Le même phénomène est observé sur le mélange C1+10%FS (M3) avec une augmentation de la résistance de l'ordre de 35 à 50% à court terme et d'environ 20 à 30% à long terme.

Pour le mélange C1+7.5%HS (M7) on voit bien que la combinaison 1%NC+0.05%TIPA est la plus performante et conduit à une augmentation des résistances mécaniques de l'ordre de 40 à 60% à court terme et d'environ 50 à 70% à long terme. Par contre pour le mélange C1+10%HS où l'on a plus d'ions silicates SiO_4 , la combinaison 0.05%TIPA prend le dessus et engendre une augmentation des résistances de l'ordre de 80 à 120% à court terme et d'environ 40% à long terme.

Quant au ciment pur C2 si on cherche à améliorer les résistances à court terme on utilise la combinaison de 1%NC+0.10%TEA qui engendre une augmentation de résistance de l'ordre de 220 à 250%. En revanche, si on veut améliorer les résistances à long terme on utilise celle de 1%NC+0.05%TIPA qui fait augmenter la résistance mécanique en compression de l'ordre de 100 à 150% par rapport à celle du mélange de référence.

Dans le mélange C2+7.5%FS (M5) toutes les courbes sont presque confondues et provoquent un accroissement de la résistance mécanique en compression de l'ordre de 50 à 90% à court terme et d'environ 35 à 40% à long terme. De ce fait pour des raisons économiques il est préférable d'utiliser la combinaison 0.1%TEA ou 0.05%TIPA car elles jouent à la fois le rôle d'accélérateur de prise et de durcissement.

Pour le mélange C2+10%FS (M6) la combinaison 1%NC+0.05%TIPA est la plus performante et conduit à une augmentation des résistances mécaniques de l'ordre de 30 à 40% à court terme et d'environ 30% à long terme.

Il est très visible que dans le mélange C2+7.5%HS (M9) la courbe de la combinaison 0.05%TIPA prend le dessus sur toutes les courbes des autres combinaisons à toutes les échéances et conduit à l'augmentation des résistances mécaniques de l'ordre de 200 à 250% à court terme et d'environ 50 à 60% à long terme.

Pour le mélange C2+10%HS (M10) la combinaison 0.10%TEA est la plus performante à court terme avec environ 100 à 200% d'augmentation de résistance par contre celle de 1%NC+0.05%TIPA prend le dessus sur les autres courbes au-delà de 3 jours et engendre un accroissement de résistance mécanique de 90 à 100% à long terme.

En conclusion les mélanges d'adjuvants qui répondent à l'objectif d'accélérateur de prise et de durcissement sont constitués par des combinaisons de 1% NC et 0.1% TEA ou 0.1% de TIPA voire 0.05% TIPA. Par contre une concentration de 0.05% de TEA reste insuffisante pour améliorer sensiblement la résistance.

CHAPITRE 9 INFLUENCE DU NITRATE DE CALCIUM ET DES ALCANOLAMINES (TEA, TIPA) SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS NORMALISES

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude de l'influence du nitrate de calcium et des alcanolamines sur la maniabilité, le temps de prise et l'évolution des résistances mécaniques des mortiers normalisés fabriqués à partir des ciments C1 et C2 afin de compléter l'étude présentée dans les chapitres précédents et réalisée sur des mélanges à base de pâtes des ciments préalablement cités.

Pour cela nous nous sommes limités à l'utilisation du nitrate de calcium avec le dosage de 1% et de la triéthanolamine et la triisopropanolamine (TEA et TIPA) avec les dosages de 0.05% et 0.10% en poids de ciment ainsi qu'à leurs combinaisons.

Le mécanisme d'action de ces adjuvants se traduit principalement par la modification des solubilités, des vitesses de dissolution et l'hydratation des divers composants des ciments hydrauliques.

Leurs mode d'action est difficile à étudier : tout n'est pas connu quant aux différentes réactions qui se superposent et s'enchaînent. Seuls des théories simplifiées peuvent être avancées.

Plusieurs théories et études admettent que les adjuvants accélérateurs de prise favorisent la croissance du silicate de calcium.

9.1 PREPARATION DES MORTIERS

Le sable utilisé pour la confection des mortiers, est un sable naturel, normal selon la norme NF P 15-403 sa masse spécifique est de 2600 kg/m³ et sa composition essentiellement siliceuse. Les grains ont une forme arrondie, sa composition granulométrique varie de 0 à 2mm et son coefficient d'absorption est inférieur à 2%. Les ciments et additions minérales sont ceux utilisés dans les études précédentes et donc déjà définis (chapitre II).

Nous avons réalisé un mortier de référence en fixant les rapports eau sur ciment (ou ciment + addition minérale) à 0.50 et celui du ciment sur sable à 1/3. ce qui conduit aux quantités suivantes :

Sable	Ciment	Eau
S	C	E
1350g	450g	225G

Tableau 9.1 : composition du mortier de référence

Lorsque le mortier est composé d'adjuvants, on utilise un artifice simplificateur c'est-à-dire le dosage en adjuvant étant donné en fonction du poids du ciment a cet effet on le convertit en fonction du poids de l'eau en préparant à l'avance des quantités d'eau avec le dosage en adjuvant équivalent qu'on appellera eau adjuvantée ce qui revient a préparer une eau avec une concentration donnée en adjuvant.

Vingt mélanges résumés dans le tableau suivant ont été étudiés.

Type de ciment	Mélanges de mortiers normalisés étudiés	% NC*	% TEA*	% TIPA*
C1	Mo1-0	0	0.00	0.00
	Mo1-1	1	0.00	0.00
	Mo1-2	0	0.05	0.00
	Mo1-3	1	0.05	0.00
	Mo1-4	0	0.10	0.00
	Mo1-5	1	0.10	0.00
	Mo1-6	0	0.00	0.05
	Mo1-7	1	0.00	0.05
	Mo1-8	0	0.00	0.10
	Mo1-9	1	0.00	0.10
C1	Mo2-0	0	0.00	0.00
	Mo2-1	1	0.00	0.00
	Mo2-2	0	0.05	0.00
	Mo2-3	1	0.05	0.00
	Mo2-4	0	0.10	0.00
	Mo2-5	1	0.10	0.00
	Mo2-6	0	0.00	0.05
	Mo2-7	1	0.00	0.05
	Mo2-8	0	0.00	0.10
	Mo2-9	1	0.00	0.10

*% en poids du ciment

Tableau 9.2: Identification des mélanges de mortiers normalisés étudiés

Le malaxage des mélanges de mortiers a été fait mécaniquement au moyen d'un malaxeur à deux vitesses conformément à la norme française NF P 15-437

9.2 ESSAI AU MANIABILIMETRE LCPC

Le maniabilimètre LCPC appelé aussi plastimètre LCPC permet de tester le mortier du point de vue de sa maniabilité dynamique. Il est utilisé indifféremment :

- ✓ Sur le chantier pour contrôler la constance de la fabrication du mortier notamment le dosage en eau.
- ✓ Au laboratoire :
 - Pour déterminer les pourcentages optimaux des constituants d'un mortier (sable, eau, ciment, rapport ciment sur sable et rapport eau sur ciment) nécessaires pour une utilisation donnée.
 - Pour vérifier l'amélioration apportée par un adjuvant en général et particulièrement les plastifiants.
 - Pour comparer deux mortiers.

Il permet aussi de dégrossir l'étude de maniabilité des petits bétons d'ouvrages dont le diamètre du plus gros grain est inférieur ou égal à 15mm. Les résultats définitifs sont obtenus au maniabilimètre à béton.

Cet essai consiste en la mesure du temps d'écoulement des mortiers et permet de déterminer si la mise en place sera correcte ou non, d'évaluer l'efficacité de certains adjuvants et d'affiner la composition du mortier ou du béton.

Cette mesure sera effectuée à l'aide du maniabilimètre conformément à la norme NF P 18-452

Le résultat de la mesure est le temps t , mis par le mortier pour atteindre le trait repère du maniabilimètre, on en déduit la consistance du mortier comme suit :

- a) T entre 0 et 10 secondes → consistance fluide
- b) T entre 11 et 40 secondes → consistance plastique
- c) T égale 41 secondes et plus → consistance ferme

Le tableau 9.3 résume les résultats des temps d'écoulement obtenus au maniabilimètre. Les mesures ont été effectuées trois fois pour chaque mélange de mortier et on prendra comme résultat final la moyenne des trois mesures.

Type de ciment	Mélanges de mortiers normalisés étudiés	Temps en secondes				
		T1	T2	T3	T moyen	%/ Réf.
C1	Mo1-0	8.4	7.6	8.0	8.0	100
	Mo1-1	5.8	5.9	5.7	5.8	72.5
	Mo1-2	5.5	6.0	5.4	5.6	70.0
	Mo1-3	6.7	4.3	4.2	5.1	63.0
	Mo1-4	3.3	5.3	3.6	4.1	51.3
	Mo1-5	4.5	4.2	4.0	4.2	52.5
	Mo1-6	5.8	5.4	5.2	5.4	67.5
	Mo1-7	5.7	5.2	5.0	5.3	66.3
	Mo1-8	5.2	5.0	4.9	5.0	62.5
	Mo1-9	4.7	4.6	4.5	4.6	57.5
C1	Mo2-0	5.1	4.5	4.4	4.7	100
	Mo2-1	3.0	2.7	2.9	2.9	61.7
	Mo2-2	4.6	4.6	4.4	4.5	95.7
	Mo2-3	4.5	4.8	4.3	4.5	95.7
	Mo2-4	4.7	4.3	4.2	4.4	93.6
	Mo2-5	5.1	5.1	5.0	5.1	108.5
	Mo2-6	3.5	4.0	4.0	3.8	80.9
	Mo2-7	3.4	3.8	3.6	3.6	76.6
	Mo2-8	3.9	4.7	4.0	4.2	89.4
	M2o-9	3.3	3.8	3.2	3.4	72.3

Tableau 9.3 : Résultat des temps d'écoulement au maniabilimètre

Les courbes des résultats obtenus 9.1 à 9.6 montrent que l'ajout des différents adjuvants dans le mortier a tendance à augmenter significativement la maniabilité du mortier. Nous sommes en présence de mortiers très fluides. Cependant, on remarque néanmoins une exception avec le ciment C2 où le mortier de référence est plus maniable que le mélange Mo2-5 dans lequel on a ajouté simultanément 1% de NC et 0.10% de TEA.

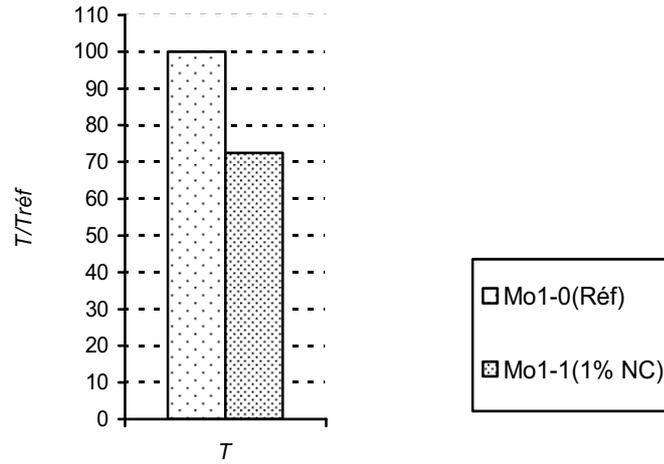


Figure 9.1 : Effet de NC sur le temps d'écoulement du mortier à base de ciment C1

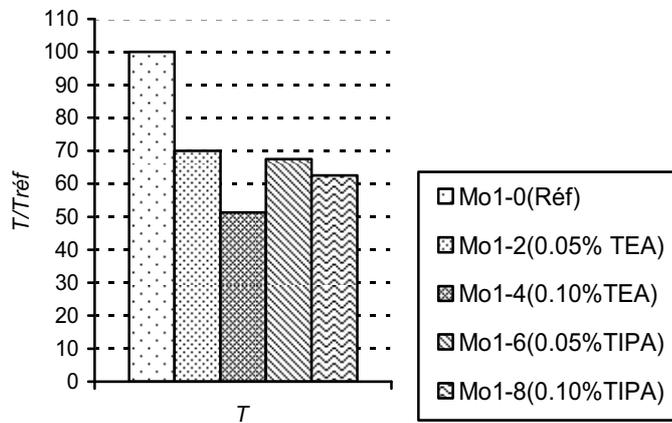


Figure 9.2 : Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C1

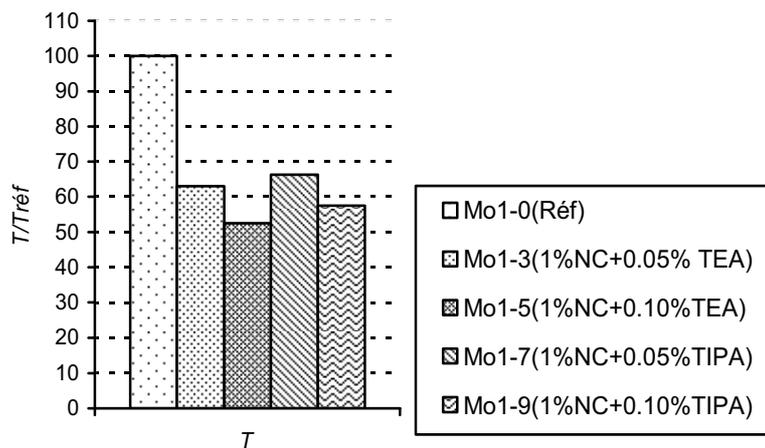


Figure 9.3 : Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA combiné à 1% NC sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C1

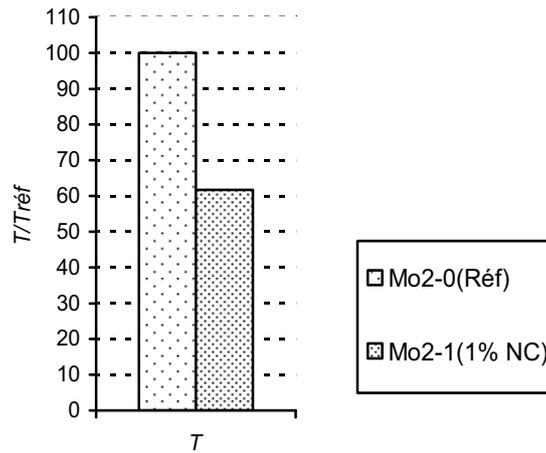


Figure 9.4 : Effet de NC sur le temps d'écoulement du mortier à base de ciment C2

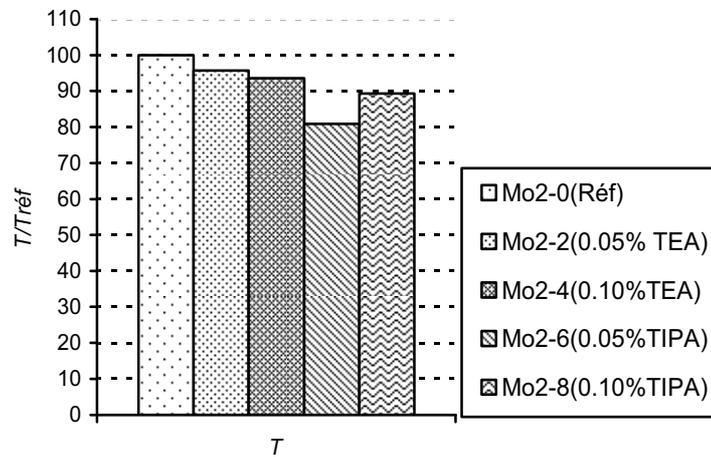


Figure 9.5 : Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C2

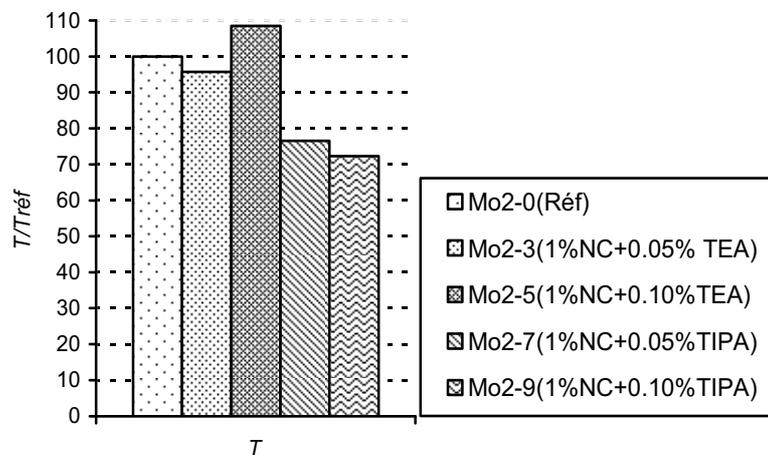


Figure 9.6: Effet du dosage en alcanolamines TEA et TIPA combiné à 1% NC sur le temps d'écoulement des mortiers à base de ciment C2

Chapitre 9

On remarque aussi que le mortier à base de ciment C2 est plus maniable que le mortier à base de ciment C1 riche en aluminates tricalciques C₃A vu que son temps d'écoulement représente 59% du temps d'écoulement de celui-ci.

Mais l'influence des différents adjuvants seuls et combinés est généralement plus significative avec le ciment C1 qu'avec le ciment C2 à l'exception de l'action du nitrate de calcium seul qui présente l'effet inverse.

9.3 TEMPS DE PRISE ET RESISTANCES MECANIQUES

Le tableau 9.4 résume les résultats des temps de prise et des résistances mécaniques des différents mélanges de mortiers normalisés étudiés

Mélanges	Temps de prise (min)				Résistance à la compression (MPa)							
	Tdp	%/Réf	Tfp	%/Réf	1 j	$\frac{R_{ij}}{R_{réf}}$	3j	$\frac{R_{ij}}{R_{réf}}$	7j	$\frac{R_{ij}}{R_{réf}}$	28j	$\frac{R_{ij}}{R_{réf}}$
Mo1-0	165	100	245	100	14	1.00	22	1.00	35	1.00	47	1.00
Mo1-1	130	78.8	195	79.6	18	1.29	26	1.18	33.5	0.96	47.5	1.01
Mo1-2	180	109.1	280	114.3	20	1.43	27.5	1.25	35	1.00	50	1.06
Mo1-3	105	63.6	155	63.3	17.5	1.25	25.5	1.16	33.5	0.96	52	1.11
Mo1-4	175	106.1	270	110.2	24	1.71	48	2.18	58.5	1.67	65.5	1.39
Mo1-5	100	60.6	150	61.2	20	1.43	45	2.05	56	1.60	55.3	1.18
Mo1-6	170	103.3	250	102	22	1.57	36	1.64	62	1.77	67	1.43
Mo1-7	100	60.6	140	44.9	25.5	1.82	34.5	1.57	60	1.83	60	1.28
Mo1-8	155	93.9	245	100	27.5	1.96	38.5	1.75	70	2.00	70	1.49
Mo1-9	95	57.6	120	49.0	30.5	2.18	41.5	1.89	60	1.71	66.5	1.41
Mo2-0	208	100	370	100	9	1.00	17	1.00	30	1.00	45	1.00
Mo2-1	165	79.3	290	78.4	7.5	0.83	15	0.88	25	0.83	48	1.07
Mo2-2	215	103.4	270	73	13.5	1.50	23	1.35	34	1.13	50	1.11
Mo2-3	145	69.7	220	59.5	11.5	1.28	25	1.47	42	1.40	55	1.22
Mo2-4	200	96.2	260	70.3	18	2.00	45	2.65	58	1.93	75	1.67
Mo2-5	135	64.9	205	55.4	25	2.78	48	2.82	55	1.83	70	1.56
Mo2-6	195	93.8	240	64.9	20	2.22	43	2.53	60	2.00	77	1.71
Mo2-7	130	62.5	195	52.7	22	2.44	44	2.59	65	2.17	80	1.78
Mo2-8	195	93.8	225	60.8	26	2.89	45	2.65	66	2.20	82	1.82
M2o-9	125	60.1	195	52.7	26	2.89	50	2.94	70	2.33	80	1.78

Tableau 9.4 : Récapitulatif des résultats de prise et de résistance mécanique des différents mélanges de mortier

9.3.1 EFFET DU NITRATE DE CALCIUM

L'objectif est d'évaluer l'influence du nitrate de calcium en tant qu'adjuvant non chloré sur le temps de début et fin de prise ainsi que sur l'évolution des résistances mécaniques en compression particulièrement ceux a court terme des mortiers normalisés fabriqués a partir des ciments de base C1 et C2. Cette étude constitue une étape importante pour notre travail dans la mesure ou nous souhaitons conserver constant le dosage en nitrate de calcium et voir le processus d'hydratation en fonction du type de ciment et sa composition minéralogique à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et vérifier les résultats déjà obtenus sur les pâtes pures.

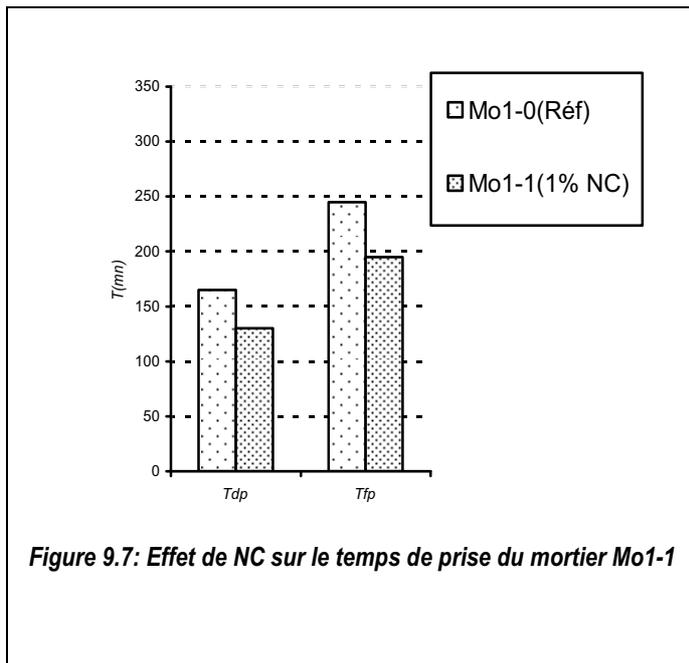


Figure 9.7: Effet de NC sur le temps de prise du mortier Mo1-1

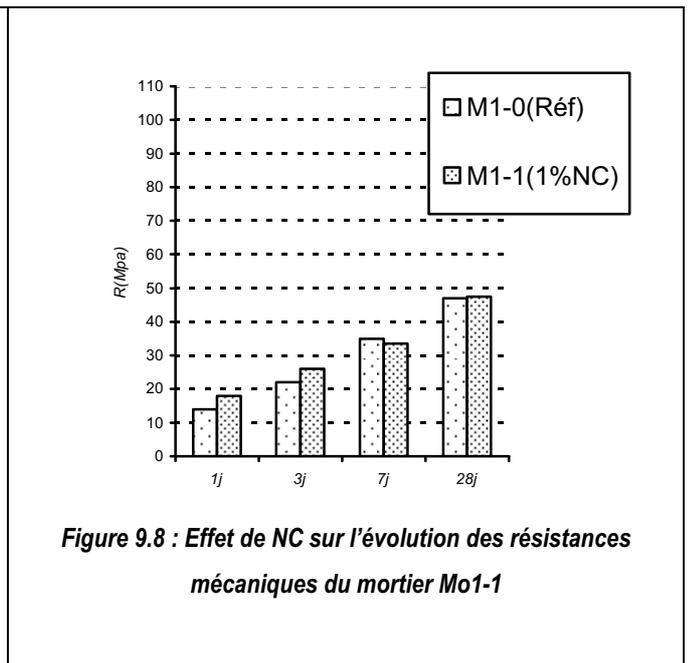


Figure 9.8 : Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1-1

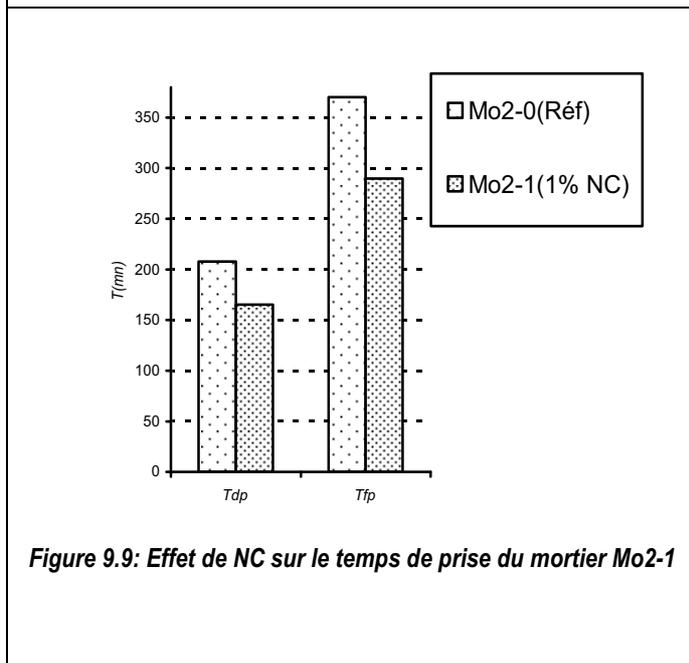


Figure 9.9: Effet de NC sur le temps de prise du mortier Mo2-1

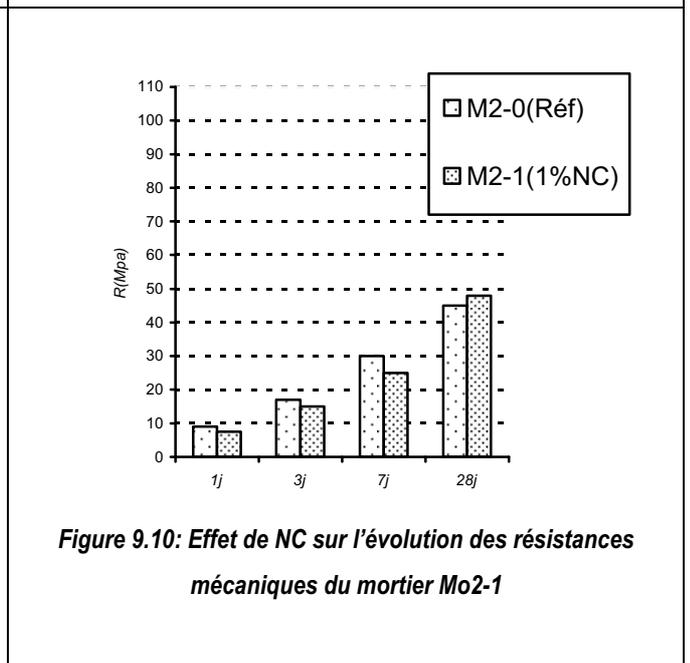
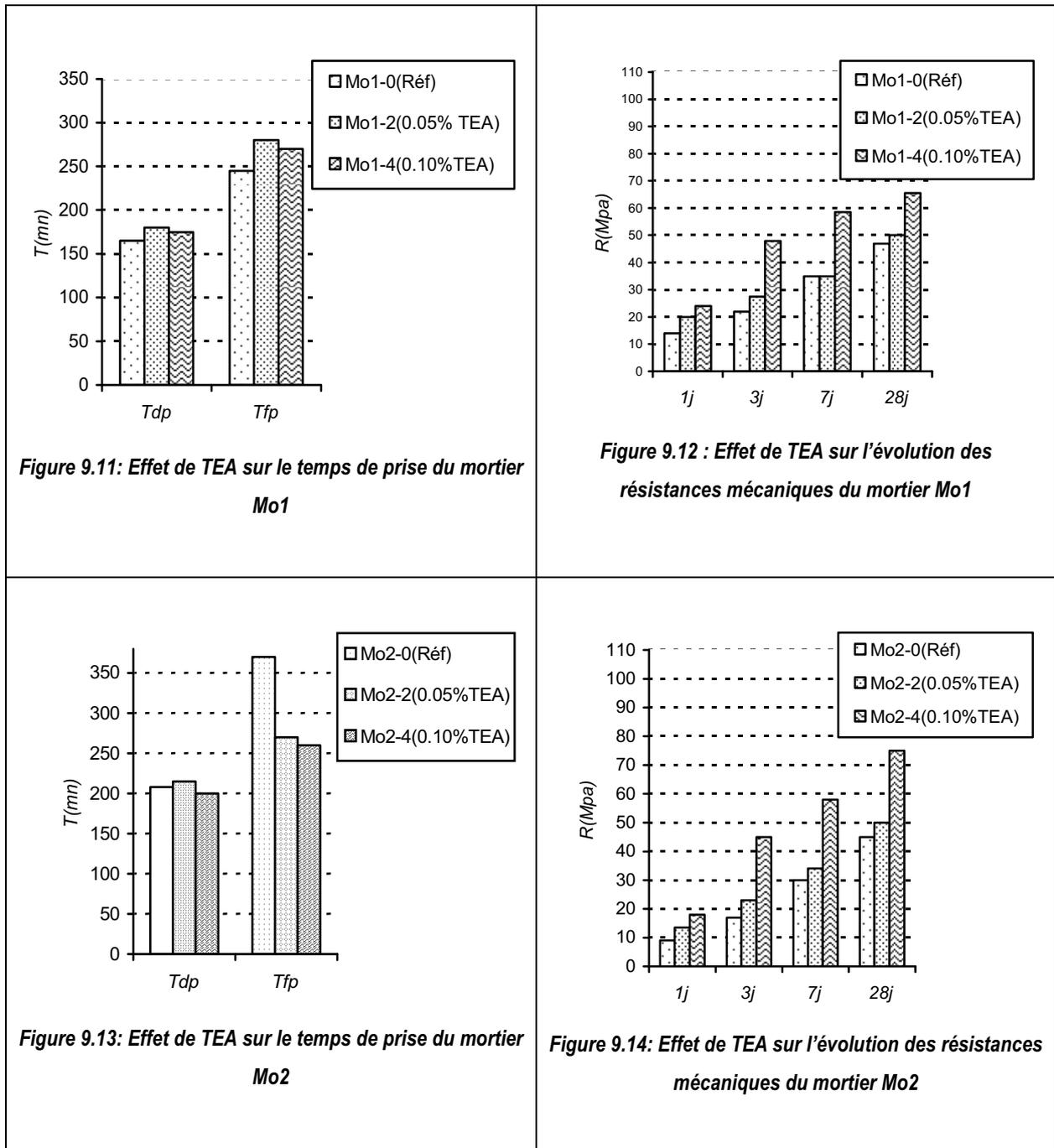


Figure 9.10: Effet de NC sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2-1

On remarque que le nitrate de calcium joue bien le rôle d'accélérateur de prise, par contre il n'a aucun effet sur le développement des résistances mécaniques si ce n'est une augmentation variant entre 29 et 18% par rapport à la référence entre 1 et 3 jours pour le mortier Mo1 à base de C1. Cependant pour le mortier Mo2 à base de C2, on observe le même phénomène sur le temps de prise et un effet inverse sur le développement des résistances mécaniques où l'on enregistre une chute de résistance de 17 à 12% entre 1 et 7 jours et une légère augmentation de 7% à 28 jours.

9.3.2 EFFET DE LA TRIETHANOLAMINE



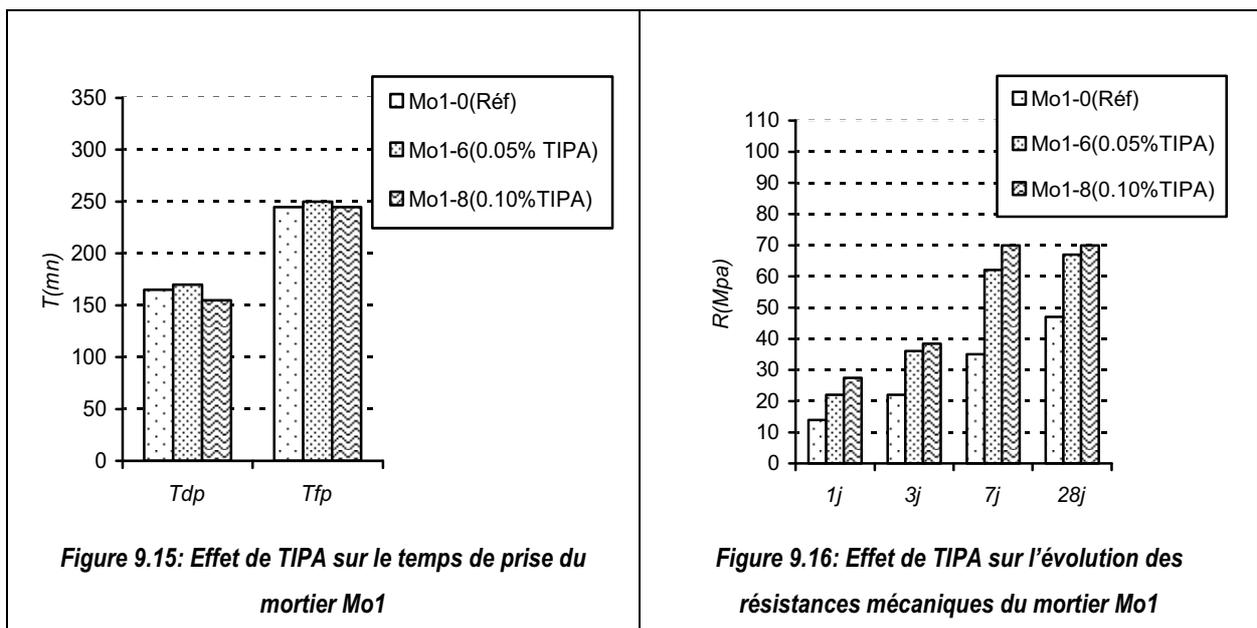
Sur les figures 9.11 – 9.14 on montre l'effet du dosage en triéthanolamine sur le temps de prise et le développement des résistances mécaniques en compression

L'utilisation de la triéthanolamine dans la cas du mortier de ciment C1 avec des taux de 0.05% et 0.1% n'entraîne pas d'effet positif sur les temps de début et de fin de prise. Par contre l'influence de la triéthanolamine est remarquable sur l'amélioration des résistances en compression. Pour 0.05% de TEA on obtient une augmentation par rapport au mélange de base de l'ordre de 43% à 1j, 25% à 3j, 6% à 28 jours. L'effet est davantage accentué avec 0.1% de TEA où l'augmentation de résistance par rapport au mélange de base enregistre des valeurs de l'ordre de 71% à 1j, 118% à 3j, 67% à 7j et 39% à 28 jours.

Dans le cas du ciment C2 une teneur de 0,05 % de triethanolamine réduit le temps de fin de prise à environ 78% par rapport au mélange de référence. Elle améliore également la résistance mécanique en compression de près de 50% à 1j, 35% à 3j, mais plus modérément de l'ordre de 13 à 11% à 7j et 28j par rapport à celle du mélange de référence. L'utilisation d'un taux de 0.1 % de triéthanolamine conduit à une réduction du temps de fin de prise à 70% du mélange de base et améliore considérablement la résistance mécanique. Cette réduction atteint des taux de 100% à 1j, 156% à 3j, 93% à 7j et 67% à 28j par rapport aux valeurs du mélange de référence.

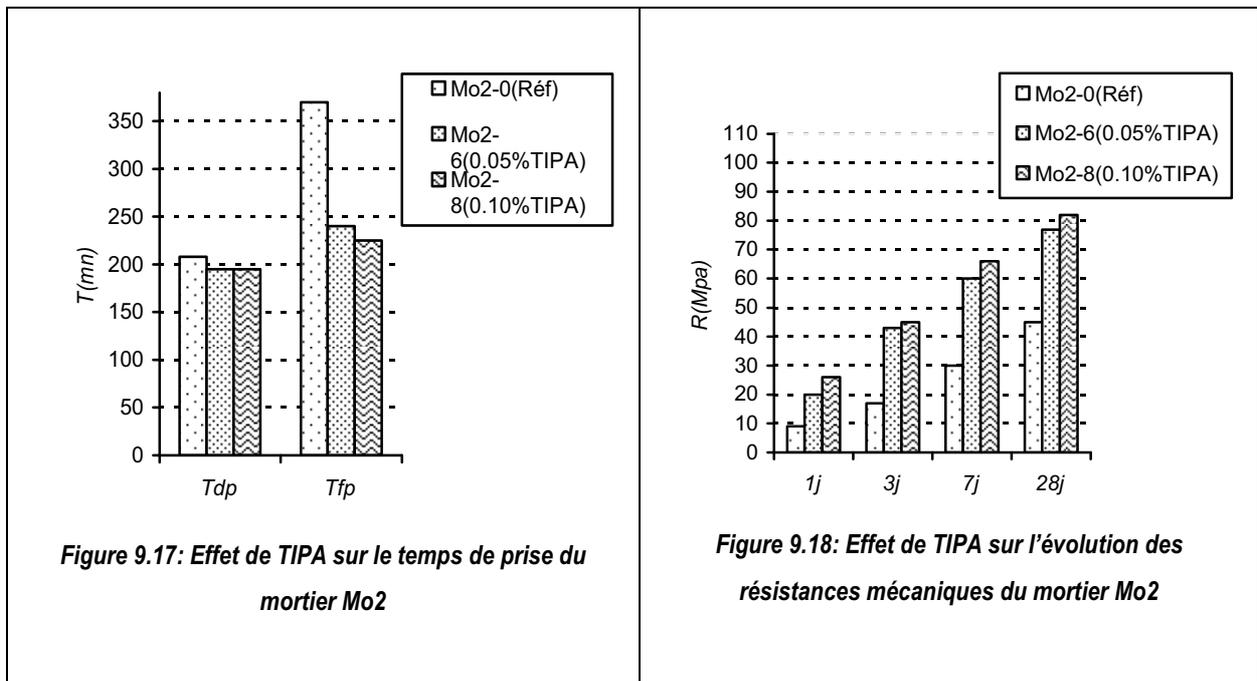
D'après ces résultats nous remarquons que la triéthanolamine remplit parfaitement son rôle d'accélérateur de durcissement quel que soit le type de ciment. L'augmentation des résistances croit de façon importante lorsque le teneur en triéthanolamine passe de 0.05% à 0.1%.

9.3.3 EFFET DE LA TRI ISOPROPANOLAMINE



Les figures 9.15 et 9.16 montrent l'effet de l'introduction respective d'une teneur en triisopropanolamine de 0.05% et 0.10% en poids du ciment C1 sur le temps de prise et l'évolution des résistances mécaniques du mortier normalisé Mo1.

L'utilisation de la triisopropanolamine dans la cas du mortier de ciment C1 avec des taux de 0.05% et 0.1% n'entraîne pas d'effet notable sur les temps de début et de fin de prise, on ne remarque qu'une légère réduction d'environ 6% sur le temps de début de prise avec la teneur de 0.10%. Par contre l'influence de la triisopropanolamine est très nette sur l'amélioration des résistances en compression. Pour 0.05% de TIPA on obtient une augmentation par rapport au mélange de base de l'ordre de 57% à 1j, 64% à 3j, 77% à 7j et 43% à 28 jours. L'effet est davantage accentué avec 0.1% de TIPA où l'augmentation de résistance en compression du mélange par rapport au mélange de base enregistre des valeurs de l'ordre de 96% à 1j, 75% à 3j, 100% à 7j et 49% à 28 jours.



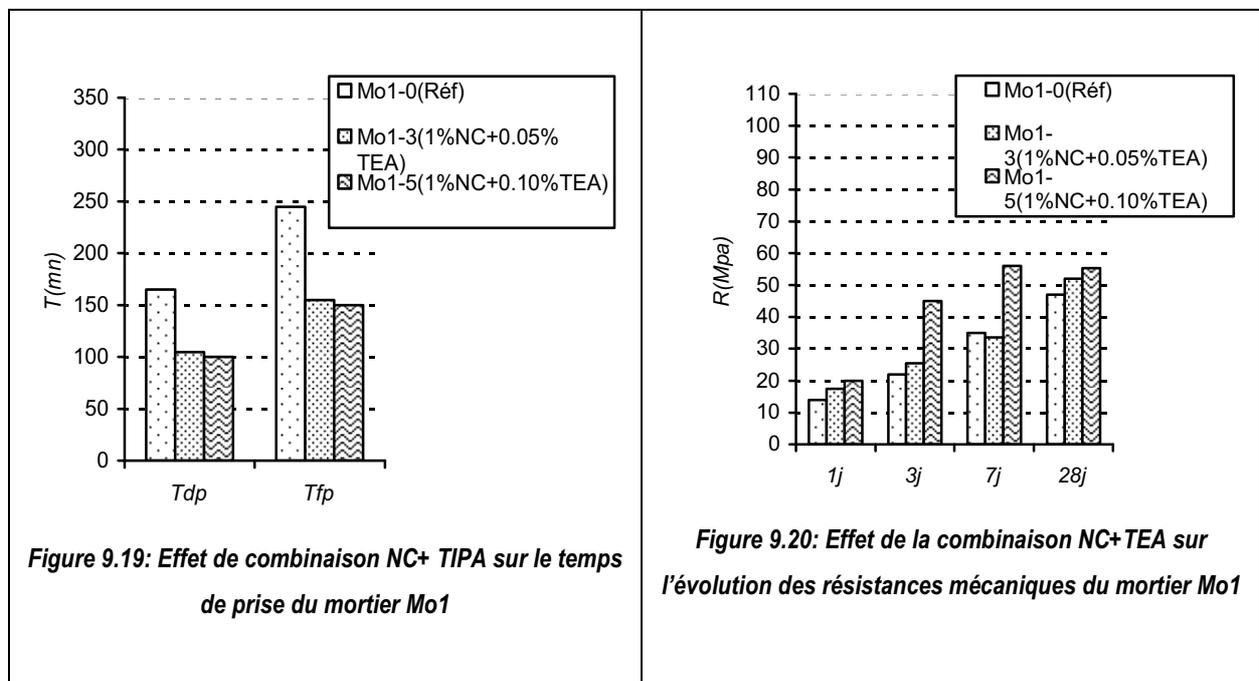
Dans le cas du ciment C2, figures 9.17 ; 9.18 montrent qu'une teneur de 0,05 % de triisopropanolamine permet de réduire le temps de fin de prise à environ 65% du mélange de référence. Elle améliore également la résistance mécanique en compression de près de 122% à 1j, 153% à 3j, 100% à 7j et 71% à 28j par rapport à celle du mélange de référence. L'utilisation d'un taux de 0.1 % de triisopropanolamine conduit aux mêmes effets que ceux obtenus pour le ciment C1. Ainsi, il réduit le temps de fin de prise à 61% du mélange de base et améliore considérablement la résistance en compression. Cette amélioration peut atteindre environ 180% à 1j, 165% à 3j, 120% à 7j et 82% à 28j par rapport à celle du mélange de référence.

D'après ces résultats nous nous pouvons dire que la triisopropanolamine comme précédemment la triéthanolamine, remplit parfaitement son rôle d'accélérateur de durcissement quel que soit le type de ciment. L'augmentation des résistances est plus importante lorsque la teneur en triisopropanolamine passe de 0.05% à 0.1%.

9.3.4 EFFET DE LA COMBINAISON NITRATE DE CALCIUM - TRI ETHANOLAMINE

La combinaison des deux composés chimiques NC+TEA est représentée sur les figures 9.19 - 9.22 les deux réactifs additionnent leurs effets puisque les temps de début et de fin de prise par rapport à ceux des mélanges de références sont réduits respectivement d'environ 67% dans le cas du mortier de ciment C1 (Mo1) et de 60 à 70% dans le cas du mortier de ciment C2 (Mo2). A noter également que doubler le dosage du TEA n'améliore pas plus les temps de prise et conduit aux mêmes valeurs que celles obtenues avec un dosage de 0.05%

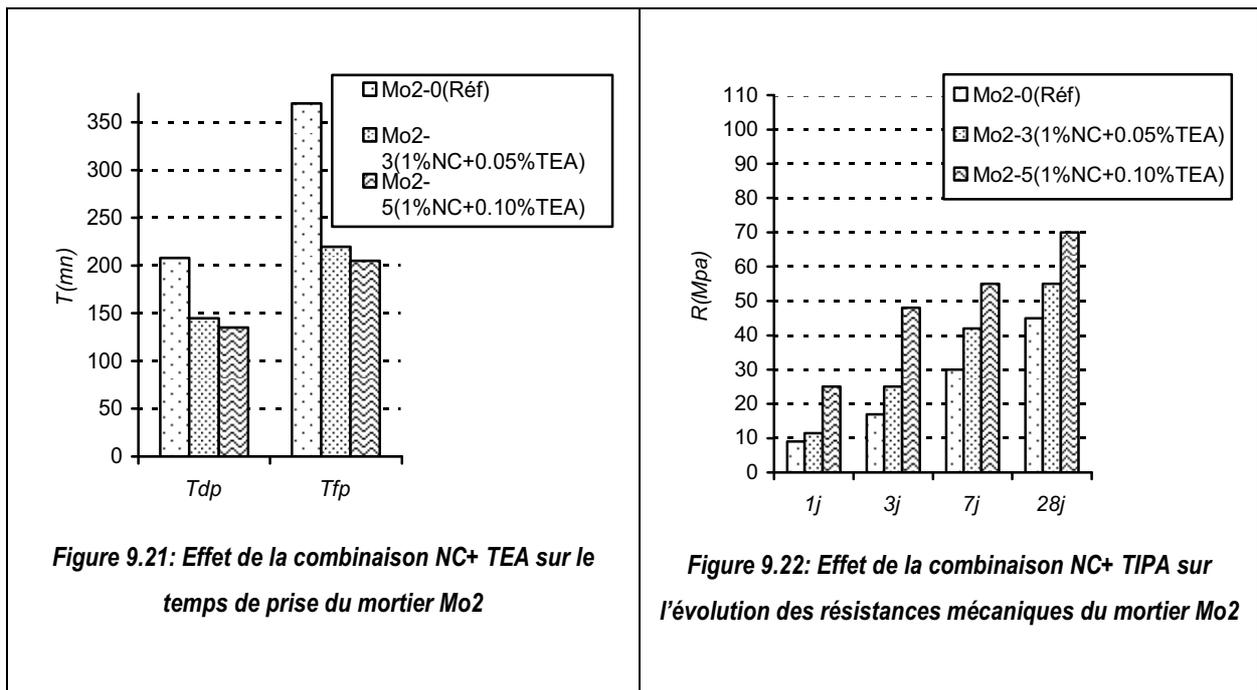
En ce qui concerne les résistances en compression, pour le mortier Mo1, l'emploi de 0.05% de TEA avec 1% de NC entraîne une augmentation de résistance de 25% à 1j, 16% à 3j, -4% à 7j et 11% à 28 jours alors qu'avec 0.1% de TEA on observe des augmentations plus nettes, à savoir 43% à 1j, 105% à 3j, 60% à 7j et 18% à 28 jours par rapport à la valeur de référence.



Pour le mortier Mo2 on remarque une meilleure réactivité de l'adjuvant notamment lorsque son dosage est plus élevé. Ainsi l'utilisation de 0.05% de TEA induit un accroissement de résistance de 28% à 1j,

47% à 3j, 40% à 7j et 22% à 28 jours alors qu'avec 0.1% de TEA les augmentations sont encore plus significatives et arrivent à des taux d'environ 178% à 1j, 182% à 3j, 83% à 7j et 56% à 28 jours par rapport aux valeurs de références.

Ces résultats montrent que les deux composés chimiques combinent leurs effets. Ainsi, la résistance mécanique est améliorée de façon significative au jeune âge pour les deux mortiers et les temps de début et fin de prise sont réduits notablement. Cet effet est davantage marqué avec le mortier de ciment C2.



9.3.5 EFFET DE LA COMBINAISON NITRATE DE CALCIUM - TRI ISOPROPANOLAMINE

Les effets combinés des deux composés chimiques NC+TIPA sont représentés sur les figures 9.23 - 9.26. Les deux produits chimiques additionnent leurs effets puisque les temps de début et de fin de prise par rapport à ceux des mélanges de références sont réduits d'environ 60 % dans le cas des deux mortiers Mo1 et Mo2. Ce qui est intéressant de noter c'est qu'il n'est pas nécessaire de doubler le dosage de la TIPA , pour avoir les meilleures performances.

En ce qui concerne les résistances mécaniques du mortier Mo1, l'emploi de 0.05% de TIPA avec 1% de NC entraîne une augmentation de résistance de 82% à 1j, 57% à 3j, 83% à 7j et 28% à 28 j par rapport à la valeur de référence. Quand le dosage de la TIPA passe à 0.1% l'augmentation de la résistance mécanique est nettement plus importante et atteint environ 118% à 1j, 89% à 3j, 71% à 7j et 41% à 28 j par rapport à la valeur de référence.

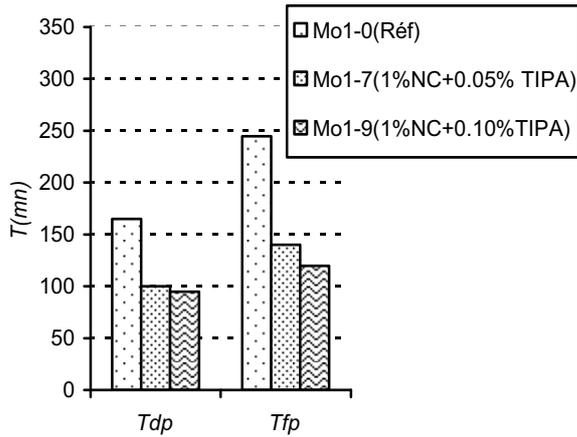


Figure 9.23 : Effet de la combinaison NC+TIPA sur le temps de prise du mortier Mo1

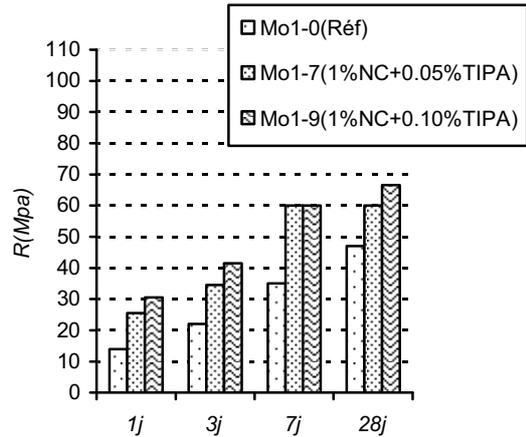


Figure 9.24 : Effet de la combinaison NC+TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo1

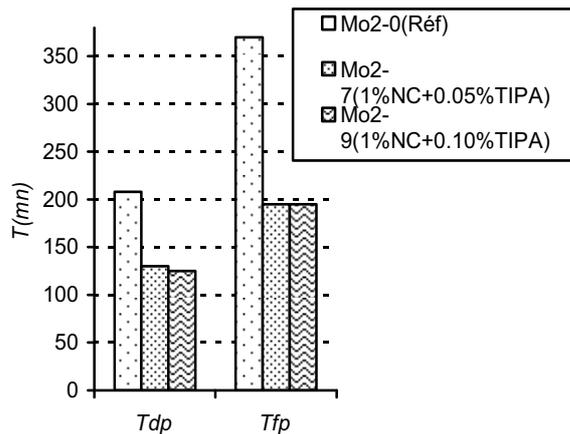


Figure 9.25: Effet de la combinaison NC+ TIPA sur le temps de prise du mortier Mo2

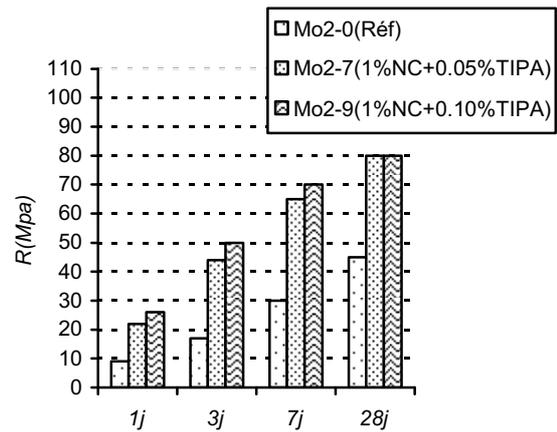
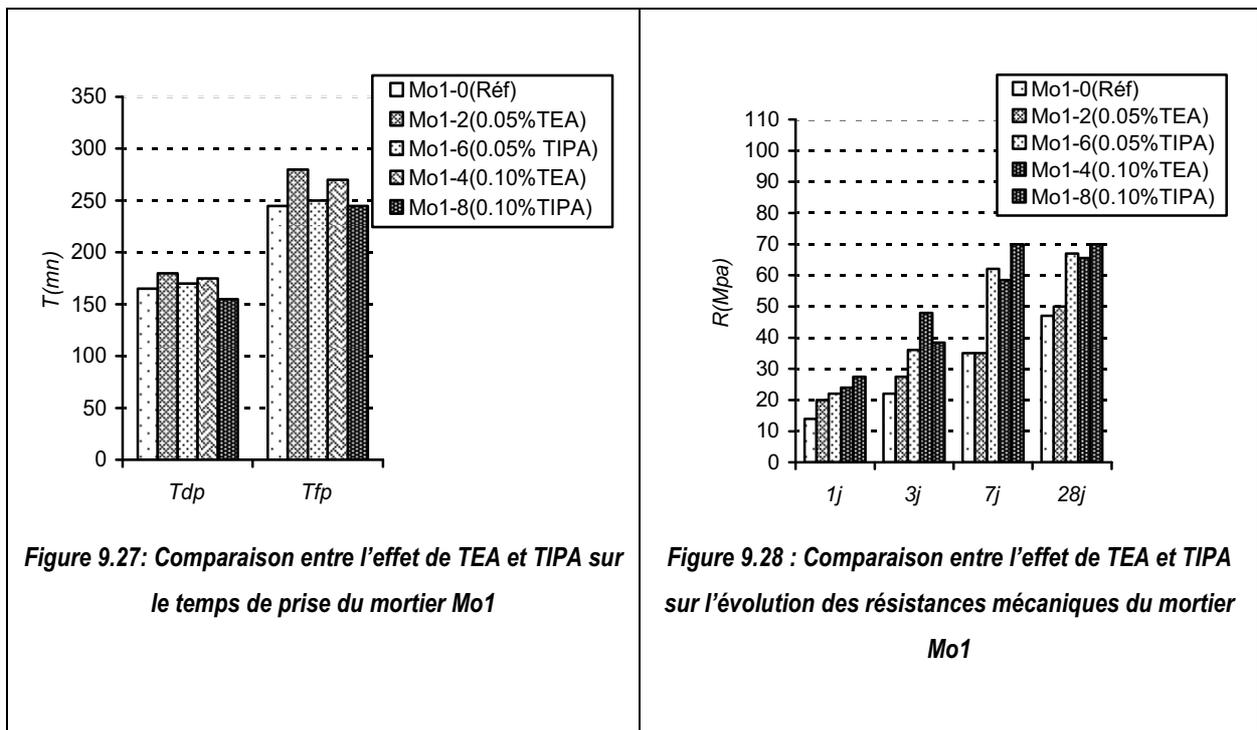


Figure 9.26: Effet de la combinaison NC+ TIPA sur l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2

A l'examen de la figure 9.26, on remarque qu'en terme de résistance mécanique, la TIPA réagit encore beaucoup mieux avec le mortier Mo2 à base de ciment C2. Ainsi, utilisé à un taux de 0.05%, la TIPA induit un accroissement de résistance de 144% à 1j, 159% à 3j, 117% à 7j et 78% à 28 jours par rapport à la valeur de référence. Avec un taux de 0.1%, elle engendre des augmentations encore plus significatives allant jusqu'à 189% à 1j, 194% à 3j, 133% à 7j et 78% à 28 jours.

Ces résultats montrent que les deux composés chimiques combinent leurs effets et améliorent d'une manière très intéressante aussi bien les temps de début et de fin de prise que la résistance mécanique notamment au jeune âge. Ce phénomène est davantage marqué avec le mortier à base de ciment C2.

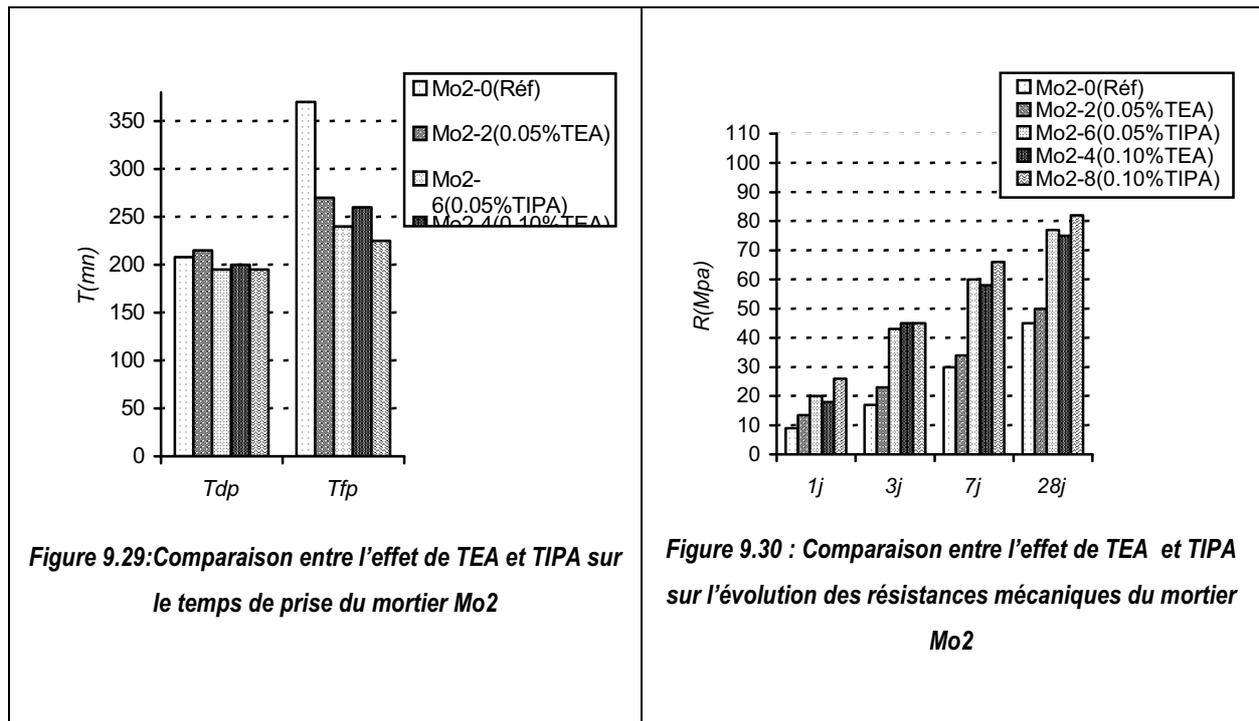
9.3.6 COMPARAISON ENTRE L'EFFET DE LA TRIETHANOLAMINE ET LA TRIISOPROPANOLAMINE



Les figures 9.27 et 9.28 illustrent la comparaison entre les effets de la triéthanolamine et trisopropanolamine sur les temps de prise et la résistance mécanique en compression du mortier normalisé Mo1. Nous pouvons donc noter que :

La TEA quelque soit son dosage (0.05 ou 0.1%) fait augmenter légèrement les temps de prise notamment le temps de fin de prise. Par contre, la TIPA ne modifie pas les temps de prise sinon légèrement le temps de début de prise quand elle est introduite au dosage de 0.1%.

En ce qui concerne les résistances mécaniques, c'est l'utilisation de la TIPA à 0.1% qui conduit, à toutes les échéances aux meilleurs performances.



Les figures 9.29 et 9.30 nous permettent de comparer les effets de la triéthanolamine et de la triisopropanolamine sur le temps de prise et l'évolution des résistances mécaniques du mortier Mo2 à base du ciment C2. Nous pouvons donc noter que :

La TIPA quelque soit son dosage d'utilisation, conduit à une légère amélioration du temps de début de prise (environ 6% par rapport à la valeur de référence). Quant à la TEA, il faut l'utiliser au dosage de 0.1% pour espérer avoir une légère amélioration presque semblable à celle apportée par la TIPA. Par contre, le temps de fin de prise est amélioré d'une manière intéressante (entre 30 et 40% par rapport à la valeur de référence), avec les deux réactifs (TIPA et TEA) quel que soit leur dosage avec une légère performance de la TIPA.

La résistance mécanique en compression est améliorée, au très jeune âge (1 jour) d'une manière considérable avec l'utilisation de la TIPA au dosage de 0.1%. Cette amélioration est d'environ 200% par rapport à la valeur de référence contre une amélioration de 50% pour 0.05% TEA, 120% pour 0.1% TEA et 100% pour 0.05%TIPA. Au-delà de 1 jour, l'utilisation de la TIPA quel que soit son dosage et le TEA au dosage de 0.1% provoquent les mêmes effets. Elles conduisent à une amélioration semblable et intéressante de la résistance mécanique. Cette amélioration est de l'ordre de 115% à 3J, 90% à 7j et 60% à 28 jours par rapport à la valeur de référence.

A noter que souvent, la TEA utilisée à 0.10% donne des valeurs de résistances mécaniques sensiblement égales à celles obtenues avec le ratio de 0.05% TIPA, par contre ne modifie pas, en général le temps de prise.

9.4 CONCLUSION

A travers ce chapitre nous confirmons les résultats déjà obtenus sur les pâtes pures indiquant que Le nitrate de calcium peut être utilisé en remplacement du chlorure de calcium comme accélérateur de prise. Cet ajout se présente comme un inhibiteur efficace de la corrosion des aciers alors que le chlorure de calcium accentue la corrosion de l'acier dans le cas du béton armé et du béton précontraint. Toutefois si cet adjuvant joue un rôle d'accélérateur de prise, il n'apporte pas, semble-t-il, d'amélioration aux résistances mécaniques. Afin d'augmenter cette résistance, nous avons utilisé des alcanolamines (la triéthanolamine et la triisopropanolamine). Les essais menés dans cette étude sur des mortiers à base des ciments C1 et C2 conduisent aux conclusions suivantes :

- Le nitrate de calcium à la teneur de 1% agit comme un accélérateur de prise et ne permet qu'une augmentation limitée de la résistance mécanique au jeune âge et ne peut être considéré comme un accélérateur de durcissement. De plus le rôle d'accélérateur de prise du nitrate de calcium semble dépendre de la nature minéralogique du ciment.
- La triéthanolamine et la triisopropanolamine au dosage de 0,05% ralentissent, dans les toutes premières heures, la vitesse d'hydratation mais contribuent rapidement par la suite à une amélioration de la résistance mécanique en compression des deux mortiers (Mo1 et Mo2). De plus pour le mortier Mo2 à base de ciment C2 riche en C_4AF , elles réduisent le temps de prise d'une manière assez intéressante. L'utilisation d'un dosage double de triéthanolamine et de triisopropanolamine montre un effet encore plus accentué sur l'augmentation des résistances notamment pour le mortier de ciment Mo2.
- La combinaison du nitrate de calcium (NC) avec des alcanolamines permet de conjuguer leurs effets dans le temps et se traduit par une amélioration considérable des résistances mécaniques à toutes les échéances d'une part et une amélioration des temps de fin de prise d'autre part (de plus de 30% pour le TEA et 40% pour le TIPA) dans le cas des mortiers Mo2 à base de ciment C2 riche en C_4AF .
- A très court terme le nitrate de calcium joue son rôle d'accélérateur de prise, puis la l'alcanolamine prend le relais en accélérant notablement la phase de durcissement, conduisant ainsi à des résistances quasiment doublées notamment à brève échéance. Les effets sont davantage marqués pour les mortiers de ciment C2 qui contiennent une concentration élevée en alumino-ferrites.
- La triisopropanolamine a un effet plus accentué sur le développement des résistances mécaniques que la TEA.

Un dosage de 0.05% de TIPA équivaut approximativement à un dosage de 0.1% de TEA au niveau des résistances.

Un dosage de 0.1% de TIPA donne de meilleurs résultats à la fois sur le temps de prise et les résistances mécaniques

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de proposer la confection d'un béton ayant la meilleure résistance mécanique possible au jeune âge pour répondre aux impératifs de construction actuels (décoffrage rapide, mise en précontrainte le plus tôt possible, bétonnage par temps froid, ...). L'obtention de tels bétons nécessite des moyens parmi lesquels on peut citer :

1. La réduction de la quantité d'eau de gâchage associée à une mise en place appropriée,
2. L'emploi d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement,
3. L'ajouter de matériaux pouzzolaniques dont la fumée de silice est le composé minéral récent le plus utilisé.

L'utilisation de cette addition minérale s'est répandue très rapidement soit en remplacement partiel du ciment soit directement comme addition. Elle permet l'amélioration des propriétés mécaniques du béton (résistance en compression, traction, flexion, module d'élasticité, fluage, adhérence avec les aciers ...etc.).

Or ce sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages ferro-siliceux onéreux est inexistant en Algérie. Aussi, le contexte algérien exige de trouver d'autres moyens et techniques nécessaires afin d'améliorer rapidement les temps de prise et de durcissement du béton ainsi que sa résistance mécanique au jeune âge répondant ainsi aux cadences de l'industrie du bâtiment et travaux publics. Ces impératifs nous ont conduit, d'une part à utiliser des adjuvants accélérateurs de prise et/ou de durcissement et, d'autre part à trouver un substitut à la fumée de silice.

Evitant à priori tous les chlorures, notre choix s'est porté sur le nitrate de calcium en tant qu'accélérateur de prise. Son dosage dans tous les mélanges est toujours constant et égal à 1% en poids du liant (ciment + addition substituée). La triéthanolamine (TEA) et la triisopropanolamine (TIPA) ont été utilisées pour leur propriété d'accélérateur de durcissement aux dosages de 0.05% et 0.1% en poids du liant.

Concernant le remplacement de la fumée de silice, nous avons utilisé du sable siliceux broyé à une finesse déterminée. Le sable siliceux peut être fourni en abondance par des gisement locaux. Deux modes opératoires ont été expérimentés concernant l'utilisation du sable siliceux. Dans le premier cas, le sable siliceux broyé finement est substitué partiellement au ciment (sable SS) tandis que dans la deuxième opération le sable est substitué directement au ciment puis le mélange ciment-sable substitué subit un malaxage-broyage de façon à obtenir une poudre de finesse équivalente à celle du ciment de base (sable HS).

Les pâtes et mortiers qui ont fait l'objet de cette étude, ont été réalisés à partir de mélanges comportant des teneurs variables en additions siliceuses (7.5 et 10%). Les additions siliceuses sont ajoutées en substitution du ciment avec un rapport eau sur liant constant de 0.30. Deux types de ciments, C1 riche en aluminates (C_3A) et C2 riche en ferrites (C_4AF), ont été utilisés dans cette étude. Ces deux ciments proviennent de deux usines différentes situées à l'est de l'Algérie.

Les résultats obtenus au cours de cette étude peuvent être exposés comme suit :

Concernant la contribution des additions siliceuses vis à vis des performances physiques et mécaniques, seize formulations de pâtes combinant des teneurs variables de sable siliceux et de fumée de silice avec les deux types de ciment C1 et C2 ont été confectionnées. Les résultats ont montré que globalement l'introduction de l'addition minérale siliceuse substituée joue un rôle positif sur les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il apparaît notamment que l'introduction de sable siliceux avec le mode opératoire de malaxage-broyage donne des résistances mécaniques supérieures à celles des mélanges de référence. L'amélioration des résistances est du même ordre que pour les mélanges avec fumée de silice et se situe au delà de 20% par rapport aux mélanges de base.

Pour l'amélioration des résistances mécaniques à court terme, objectif principal de ce travail, des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement ont été introduits. Dans un premier temps, nous avons analysé l'effet de chaque adjuvant introduit seul sur la prise et la résistance mécanique des pâtes pures et des différents mélanges à base des ciments C1 et C2. Dans une seconde phase, nous avons étudié l'effet de l'utilisation de combinaisons d'adjuvants (accélérateurs de prise + accélérateurs de durcissement) sur les caractéristiques de ces mélanges. Les résultats obtenus sont prometteurs, dans la mesure où des résultats significatifs ont été obtenus, à savoir :

1. Le nitrate de calcium à la teneur de 1% agit comme un accélérateur de prise à 20°C et se traduit par une amélioration de la résistance en compression au bout de 24 heures. Toutefois, à moyen et long terme, l'augmentation de cette résistance est trop faible pour qu'il soit considéré comme un accélérateur de durcissement. De plus le rôle d'accélérateur de prise du nitrate de calcium semble dépendre de la nature minéralogique du ciment. Ainsi, du point de vue temps de prise, l'efficacité du nitrate de calcium avec un dosage de 1% du poids de ciment est plus grande sur le ciment de base C2 faible en aluminates de calcium que sur le ciment de base C1. Son efficacité sur les mélanges à base de ciment C2 apparaît en particulier sur les mélanges comportant du sable HS pour lesquels, il peut conduire à une réduction du temps de début de

Conclusion générale

prise de l'ordre de 50% et du temps de fin de prise de l'ordre de 25%. Du point de vue résistance en compression le nitrate de calcium réagit mieux avec le mélange de pâte pure à base de ciment C1 qu'avec celui à base de C2.

Le nitrate de calcium joue effectivement un rôle d'accélérateur de prise mais n'apporte pas d'amélioration de la résistance du béton à moyen et long terme. Afin d'augmenter cette résistance, l'ajout de composés de la famille des alcanolamines (triéthanolamine et triisopropanolamine) a été réalisé. Ces alcanolamines ont été utilisées avec des dosages respectifs de 0.05% et 0.10% en poids du liant.

2. La triéthanolamine n'agit que sur le temps de fin de prise de la pâte pure à base du ciment C2 riche en C_4AF . Ainsi elle conduit à une réduction du temps de fin de prise de l'ordre de 70% pour les deux dosage concernés.

Dans le cas du ciment C1, elle n'agit sur les temps de début et fin de prise que lorsqu'elle est introduite dans des mélanges comportant des additions de sable siliceux. Ainsi, la réduction du temps de début et fin de prise peut être respectivement de 50% et 25% pour un dosage de 0.05% en TEA dans le cas du mélange avec 7.5% SS.

Dans tout les cas, il faut noter que, le passage à un dosage double de triéthanolamine n'apporte pas de modifications significatives sur les temps de début et fin de prise.

Du point de vue de la résistance mécanique et concernant le ciment C1, la triéthanolamine est plus efficace sur les mélanges de pâte pure et sur ceux comportant du sable siliceux HS à condition que son dosage d'utilisation soit de 0.10% en poids du liant.

Pour le ciment C2, elle est très efficace dès le dosage de 0.05% pour les mélanges de pâte pure et pour ceux comportant du sable siliceux HS. Cette efficacité est encore plus grande quand on passe à une teneur double de triéthanolamine. Elle se traduit, à très court terme par des résistances grandement améliorées. Par exemple à un jour dans le cas du mélange C2 avec 7.5% HS la résistance mécanique est multipliée par un facteur de quatre par rapport à la valeur de référence.

3. L'utilisation de la triisopropanolamine avec les différents mélanges à base des ciments C1 et C2 conduit globalement aux mêmes constatations que celles observées dans le cas de triéthanolamine en terme d'améliorations des temps de début et de fin de prise.

Concernant les résistances mécaniques et dans le cas du ciment C1, la triisopropanolamine conduit à des amélioration très importantes notamment dans le cas des mélanges de pâtes pures

et de celles avec addition de sable HS. Cette amélioration n'est pas significativement différente lorsque le dosage en triisopropanolamine passe de 0.05% à 0.1%. elle est similaire à celle obtenue dans le cas de l'introduction de 0.1% de triéthanolamine.

Pour le ciment C2, riche en C₄AF, la triisopropanolamine conduit à des améliorations de la résistance mécanique pour tous les mélanges et à toutes les échéances. Néanmoins, l'amélioration la plus spectaculaire est celle obtenue à très court terme (1 et 3 jours) pour le mélange avec addition de 7.5% de sable HS. L'augmentation de résistance est de 300 à 400% par rapport à celle obtenue pour le mélange de référence, quel que soit le dosage en triisopropanolamine. Elle est presque similaire à celle obtenue avec 0.1% de TEA.

Ces résultats montrent que la triisopropanolamine se comporte comme un accélérateur de durcissement performant dépendant du type de ciment utilisé.

4. L'utilisation d'une combinaison d'adjuvants NC+TEA d'une part et NC+TIPA d'autre part, conduit pour tous les mélanges qu'ils soient à base de ciment C1 ou à base de ciment C2 à des réductions très importantes de l'ordre de 50% des temps de début et de fin prise. La réduction la plus importante (environ 70% par rapport à la valeur de référence) est celle obtenue avec le mélange C2 +7.5% de sable HS et la combinaison NC+TIPA quel que soit le dosage d'utilisation de la triisopropanolamine (0.05% ou 0.1%).

En terme de résistances mécaniques, l'utilisation des alcanolamines combinées au nitrate de calcium (NC) dans les différents mélanges et avec les deux types de ciments C1 et C2 conduit pratiquement aux mêmes phénomènes que ceux obtenus par chaque alcanolamine utilisée seule. Les augmentations de résistance sont particulièrement importantes dans le cas du ciment C2 notamment pour les mélanges comportant du sable HS.

A priori l'utilisation de la combinaison d'adjuvants nitrate de calcium et alcanolamines (TEA ou TIPA) apporte peu d'amélioration, en terme de résistance mécanique que celle obtenue par les alcanolamines utilisées seules. Néanmoins, l'intérêt de la combinaison des adjuvants est considérable en terme de réduction des temps de prise. Ainsi, la combinaison des deux réactifs, nitrate de calcium et alcanolamine permet de conjuguer leurs effets qui se traduisent, mise à part l'amélioration considérable des résistances mécaniques à toutes les échéances, par une réduction très importante des temps de début et de fin de prise.

Conclusion générale

En conclusion, les résultats de cette étude montrent que les objectifs affichés initialement sur les deux axes de recherche proposés ont été globalement atteints

Tout d'abord en ce qui concerne le remplacement de la fumée de silice trop onéreuse par un autre composé minéral siliceux, les résultats indiquent qu'une substitution du ciment par un sable siliceux jusqu'à des teneurs de 10% permet d'améliorer sensiblement la résistance en compression par rapport au mélange de base. Lorsque l'ajout de sable siliceux subit un traitement de broyage-malaxage avec le ciment, la substitution donne d'excellents résultats. L'amélioration de la résistance est tout à fait comparable à celle de l'ajout de la fumée de silice pour des teneurs similaires.

En ce qui concerne l'obtention d'un effet accélérateur de prise et de durcissement, les résultats montrent que la réalisation de mélanges d'adjuvants de type alcanolamine avec du nitrate de calcium permettent d'obtenir une réponse appropriée. Ainsi, une combinaison d'éthanolamine ou d'isopropanolamine à une teneur de 0.1% avec du nitrate de calcium à une concentration de 1% donne d'excellents résultats. Ceux-ci sont particulièrement intéressants précisément pour les mélanges de sable siliceux homogénéisé par broyage-malaxage avec le ciment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Dodson V.H, Farkas, E and Rosenberg, A.M. , “Non-Corrosive Accelerator for setting of Cements”, U.S Patent N° 3, 210,207, Oct 1965.
- [2] J. BYFORS, “Plain Concrete at Early Ages”, CBI Research Report, N°3: 80, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm,(1980), 344p.
- [3] COLLINS, “Research of High Strength Concrete in Canada”, Third symposium on utilization of high strength concrete, Lillehammer, Norway, June (1993).
- [4] J, MagGregor, “Canadian Network of Centers of Excellence on High Performance Concrete”, *Concr. Int.* 15(2) (1993), pp 60-61.
- [5] H KITAMURA, T. Hishizaki, S. Sogo, “Study on High Performance Concrete for Inverse Casting Method and its Pratical Application “, *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.* 43 (1991), pp 956-962.
- [6] S.P.SHAH “Reserarch on High Performance Concrete at the Advanced Cement-Based Materials Center” Third symposium on high strength concrete Lillhammer, Norway, June 1993.
- [7] Y Mailler “ Propriétés Constructives des Bétons à Très Hautes Performances”, *Les Bétons à Hautes Performances: du Matériau à l'Ouvrage*, Presse Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1990.
- [8] A. Aswad , W.T Hester, “Impact of High Strength Concrete on Design and Service Behaviour of Prestressed Precast concrete members”, in *High Strength Concrete*, ACI SP87, (1985), pp 9-20.
- [9] L.J.Parrott, “The Selection of Constituents and Proportions for Producing Workable Concrete with a Compressive Cube Strength of 80 to 110 N/mm²”, London, Cement and Concrete Association (1969), pp 12 technical report 416(publication 42-416).
- [10] Yunsheng Zhang, Wei Sun, Seifeng Liu, “Study on the hydration of binder paste in high-performance concrete,” *Cement and Concrete Research* 32, April (2002), pp 1483-1488.
- [11] F. De larrard “ Formulation et propriétés constructives des bétons à très hautes performances”, *Rapport de recherché des LPC N°149, LCPC, Paris Mars (1988).*
- [12] F. De larrard “Ultrafine Particles for the Making of Very High-Strength Concrete” *Cement and Concrete Research*, Jan - Feb. (1989), Vol. 19, pp 161-172.
- [13] F. De larrard “ Particules Ultrafines pour l'Elaboration des Bétons à Très Hautes Performances” *Les bétons à hautes performances*, Chapitre 3, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, deuxième édition, (1992) pp 65-77.
- [14] BRESON J “ Prediction of strength of Concrete Products” RILEM International Conference on concrete at early ages, Paris , Ecole Nationale des Ponts et chaussees (1982), pp 111-115.

- [15] E.JSELLEVOLD, F.F RADJY "Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete: Water Demand and Strength Development", Fly-Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, ACI, SP-79,677, (1983).
- [16] H. KADRI " Contribution à l'Etude de l'Influence de la Fumée de Silice sur les Caractéristiques des Bétons a Hautes Performances" thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, Octobre (1998).
- [17] G. C. CARETTE ET V. M. MAHOTRA, "Mechanical Properties, Durability and Drying Shrinkage of Portland Cement Concrete Incorporating Silica Fume", Cement Concrete and Aggregates, 5:1:3-13 (1983).
- [18] J.J Brooks, M.A. Mezat Johari, M. Mzloom "The effect of admixtures on the setting time of high strength concrete" Cement and Concrete Composites 22 (2000), pp 293-301.
- [19] Anissa Bessa- BADREDDINE "étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers" thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, juin (2004).
- [20] A. BOUDCHICHA, M CHEIKH-ZOUAOUI, B MEZGHICHE, J.L.GALLIAS "Evaluation of the physical and chemical action of fine and ultra fine additions on mortars" 7th ICCE IRAN May 8-10-(2006), E1248,pp 41.
- [21] J. BRON, J.P OLLIVIER "Le Bétons Bases et Formulations", Association de l'industrie des liants hydrauliques, deuxième tirage Eyrolles, (1997).
- [22] Adam M. NEVILLE "Propriétés des bétons ", Eyrolles (2000).
- [23] C.JOLICOEUR, P.C. NKINAMUBANZI, "Progress in Understanding the Functional Properties of Superplastizers in Fresh Concrete, Fourth", CANMET/ ACI International Conference on Superplastizers and other chemical admixtures in Concrete, Montreal, Octobre (1994), ACI, Ed., SP-148,63-88.
- [24] P.C. Aïtcin " Les Superplastifiants : des Réducteurs d'eau pas comme les autres" Recueil de conférences présentées à l'Université de Sherbrooke ,(1990).
- [25] P.C.Aïtcin "L'emploi des Fluidifiants dans les Bétons à Hautes Performances", Les bétons à hautes performances, Chapitre 3, Presse de l'Ecole National des ponts et Chaussées, Paris, deuxième Edition, (1990), pp 45-64.
- [26] Fernom V. "Etude de Nouveaux Solides Lamellaires Obtenus par Coprécipitation d'hydrate Aluminocalcique et de Sulfonate Aromatique", Thèse de doctorat, Université d'Orléans, novembre (1994).
- [27] Mohamed HEIKKAL "Effect of Calcium Formate as an Accelerator on the Physicochemical Properties of Pozzolan Cement Pastes", Cement and Concrete Research, 34 (2004), pp1051-1056.
- [28] D.L KANTRO, "Tricalcium silicate hydration in the presence of various salts", J.Test. Eval. , (1975), 3, 4, 312-321.

:

- [29] H.F.W. TAYLOR "Cement Chemistry", Academic Press, Ed., London, (1990).
- [30] V.S RAMACHANDRAN "Investigation of the Role of Chemical Admixture in Concrete, a Differential Thermal Approach" 7th International conference on thermal analysis, Kingston Ontario, August (1982), 1296-1302.
- [31] V.H Dodson., "Concrete Admixtures, "Set accelerating admixtures", Van Norstrand Reinhold, Ed. New York, (1990), Structural Engineering Series.
- [32] KUNT O. KJELLEN., RACHEL J. DETWILER "Later-age Strength Prediction by Modified Maturity Model": "ACI Materials Journal, Vol. 90 N°3 May-June (1993), pp.220-227.
- [33] CARINO N.J. LEW H. S. VOLTZ C. K., "Early-age Temperature effect on Strength Prediction by Maturity Method", ACI Materials Journal, Vol. 92 N°2 March-April (1983), pp.93-101.
- [34] GUO CHENGJU, "Maturity for Predicting Early Stage Strength", ACI Materials Journal, Vol. 86 N°4 July - August (1989), pp.341-353.
- [35] CARINO N.J, "Maturity Function for Concrete ", Colloque International RILEM sur le béton jeune, Paris, 6-8 Avril (1982), 1, 123-128.
- [36] V.H Dodson., "Concrete Admixtures, Chapter 4": "Set Accelerating Admixtures", New York, Van Norstrand Reinhold, (1971), p. 73 – 102.
- [37] Dodson V.H., Farkas E., Rosenberg A.M., "Non-Corrosive Accelerator for Setting of Cements" U.S Patent N° 3.210, 207, Oct.5, (1965).
- [38] Angstadt R.L., Hurley F.R., "Accelerator for Portland Cement" U.S patent N° 3, 427, 175, Feb. 11, (1969).
- [39] RIXOM M.R., MAILVAGANAM N. P., "Chemical Admixtures for concrete", E & F.N Spon. Ed., London, (1986), second edition.
- [40] V.S RAMACHANDRAN "Hydration of Cement – Role of Triethanolamine" Cement and Concrete Research (1976), Vol. 6, pp. 623-632.
- [41] M. PAURI, S. Monosi, G. Moriconi and M. Collepardi, Proceeding 8th International Congress On The Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 3, (1975).
- [42] V.T YLLMAZ, N MENEK, M ODABASOGLU "Quantitative Determination of Triethanolamine in Cements", Cement and Concrete Research. (1993), Vol. 23, pp. 603-608.
- [43] Justnes H., Structures and Concrete Trondheim, Norway, (1992), pp 29.
- [44] Justnes H., Report STF 70 F 93013, (1993), 28 pp, SINTEF Structures and Concrete, Trondheim, Norway.

- [45] Justnes¹ H., Report STF 70 F 93 138, (1993), 40 pp, SINTEF Structures and Concrete, Trondheim, Norway.
- [46] Justnes H., Nyguard E.C., Nordic Concrete Research 13 70, (1993) .
- [47] Justnes H., Nyguard E.C., <<Corrosion Protection of Steel in Concrete>>, Proceeding of the International Conference, Sheffield, UK, July 25-28 (1994), vol I, p. 491-502.
- [48] Justnes H., Nyguard E.C., <<Accelerator Blends For Portland Cement>>, Proceedings of the, Second International symposium: cement and concrete technologie in the 2000s, Istanbul, Turkey, 6-10 September (2000), p. 433 – 442.
- [49] Tokay V., U.S Patent N° 4, 337, 094, June (1982).
- [50] Ellis Gartner, David Myers” Influence of Tertiary Alkanolamines on Portland Cement Hydration”, Journal of the American Ceramic Society, vol. 76, n° 6, (1993), pp 1521-1530.
- 51] T. Sage, V.S Ramachandran ET G.m Polomark”The Effect of Sulfo cyanates on the Hydration of Portland Cement at Low Temperatures” Tthermochimica Acta, ELSEVIER 264(1995), pp 157-171.
- [52] Paul J. Sandberg, F. Doncstar ”On the mechanism of strength enhancement of cement paste and mortar with triisopropanolamine” Cement and Concrete Research 34 (2004), pp 973-976.
- [53] R. DUVAL, E.H. KADRI ”La fume de silice et la maniabilité des bétons à hautes performances ”Annales du Bâtiment et des Travaux Publics (France), n° 5, Nov. 1997,pp 21-26.
- [54] R. DUVAL, E.H. KADRI, ”Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes”, Cement and Concrete Research, Vol. 28n°4, April 1998, pp 533-547.
- [55] Mohammad-Rasoul Suliman, Mohammed Awwad, ”Utilization of Silica in Early-High Strength Concrete” Cement and Concrete Technology in the 2000 s, Second International Symposium, 6-10 Sept. 2000 Istanbul, Turkey.
- [56] M.Cheikh-Zouaoui, S. Aggoun, N. Chikh, R. Duval” Effets du Nitrate de Calcium et de la Triethanolamine sur le Temps de Prise et l'évolution des Résistances Mécaniques au Jeune Age des Pâtes de Ciment ” Revue européenne de Génie Civil , Volume 10-n°4/ (2006), pp 475-485 .
- [57] M.Cheikh-Zouaoui, S. Aggoun, N. Chikh, R. Duval” Effect of Some Admixtures on the Setting Time and Strength Evolution of Cement Pastes at Early ages ” Construction and Building Materials.22(2008)106-110; ELSEVIER ,Received 6 Aug. 2004: received in revised form 19 April 2006; Accepted 25 May 2006, Available online 9 Nov. 2006.
- [58] M.Cheikh-Zouaoui, S. Aggoun, N. Chikh, R. Duval” Effects of Calcium Nitrate and Triisopropanolamine on the Setting and Strength Evolution of Portland Cement Pastes ” RILEM2006, Materials and Structures(2008) 41: 31-36 / Accepted 28 Nov.2006/ Published online 23 Jan.2007

ANNEXE 1 : DEFINITION DES MELANGES

Type de ciment	Mélanges étudiés	% NC*	% TEA*	% TIPA*	%FS	%SS	%HS
C1	M1-0	0	0.00	0.00	/	/	0.00
	M1-1	1	0.00	0.00			
	M1-2	0	0.05	0.00			
	M1-3	1	0.05	0.00			
	M1-4	0	0.10	0.00			
	M1-5	1	0.10	0.00			
	M1-6	0	0.00	0.05			
	M1-7	1	0.00	0.05			
	M1-8	0	0.00	0.10			
	M1-9	1	0.00	0.10			
C1	M2-0	0	0.00	0.00	/	/	7.50
	M2-1	1	0.00	0.00			
	M2-2	0	0.05	0.00			
	M2-3	1	0.05	0.00			
	M2-4	0	0.10	0.00			
	M2-5	1	0.10	0.00			
	M2-6	0	0.00	0.05			
	M2-7	1	0.00	0.05			
	M2-8	0	0.00	0.10			
	M2-9	1	0.00	0.10			
C1	M3-0	0	0.00	0.00	/	/	10.00
	M3-1	1	0.00	0.00			
	M3-2	0	0.05	0.00			
	M3-3	1	0.05	0.00			
	M3-4	0	0.10	0.00			
	M3-5	1	0.10	0.00			
	M3-6	0	0.00	0.05			
	M3-7	1	0.00	0.05			
	M3-8	0	0.00	0.10			
	M3-9	1	0.00	0.10			

Tableau 2.5: Identification des mélanges

*FS=fumée de silice ; SS= sable siliceux broyé substitué au ciment ; HS= sable siliceux substitué au ciment puis homogénéisé et rebroyé.
% en poids du ciment

Type de ciment	Mélanges étudiés	% NC*	% TEA*	% TIPA*	%FS	%SS	%HS
C2	M4-0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	M4-1	1	0.00	0.00			
	M4-2	0	0.05	0.00			
	M4-3	1	0.05	0.00			
	M4-4	0	0.10	0.00			
	M4-5	1	0.10	0.00			
	M4-6	0	0.00	0.05			
	M4-7	1	0.00	0.05			
	M4-8	0	0.00	0.10			
	M4-9	1	0.00	0.10			
C2	M5-0	0	0.00	0.00	7.50	0.00	0.00
	M5-1	1	0.00	0.00			
	M5-2	0	0.05	0.00			
	M5-3	1	0.05	0.00			
	M5-4	0	0.10	0.00			
	M5-5	1	0.10	0.00			
	M5-6	0	0.00	0.05			
	M5-7	1	0.00	0.05			
	M5-8	0	0.00	0.10			
	M5-9	1	0.00	0.10			
C2	M6-0	0	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00
	M6-1	1	0.00	0.00			
	M6-2	0	0.05	0.00			
	M6-3	1	0.05	0.00			
	M6-4	0	0.10	0.00			
	M6-5	1	0.10	0.00			
	M6-6	0	0.00	0.05			
	M6-7	1	0.00	0.05			
	M6-8	0	0.00	0.10			
	M6-9	1	0.00	0.10			

Tableau 2.5 (suite)

FS=fumée de silice ; SS= sable siliceux broyé substitué au ciment ; HS= sable siliceux substitué au ciment puis homogénéisé et rebroyé.
 *% en poids du ciment

ANNEXES

Type de ciment	Mélanges étudiés	% NC*	% TEA*	% TIPA*	%FS	%SS	%HS
C1	M7-0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	7.50
	M7-1	1	0.00	0.00			
	M7-2	0	0.05	0.00			
	M7-3	1	0.05	0.00			
	M7-4	0	0.10	0.00			
	M7-5	1	0.10	0.00			
	M7-6	0	0.00	0.05			
	M7-7	1	0.00	0.05			
	M7-8	0	0.00	0.10			
	M7-9	1	0.00	0.10			
C1	M8-0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
	M8-1	1	0.00	0.00			
	M8-2	0	0.05	0.00			
	M8-3	1	0.05	0.00			
	M8-4	0	0.10	0.00			
	M8-5	1	0.10	0.00			
	M8-6	0	0.00	0.05			
	M8-7	1	0.00	0.05			
	M8-8	0	0.00	0.10			
	M8-9	1	0.00	0.10			
C2	M9-0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	7.50
	M9-1	1	0.00	0.00			
	M9-2	0	0.05	0.00			
	M9-3	1	0.05	0.00			
	M9-4	0	0.10	0.00			
	M9-5	1	0.10	0.00			
	M9-6	0	0.00	0.05			
	M9-7	1	0.00	0.05			
	M9-8	0	0.00	0.10			
	M9-9	1	0.00	0.10			

Tableau 2.5 (suite)

FS=fumée de silice ; SS= sable siliceux broyé substitué au ciment ; HS= sable siliceux substitué au ciment puis homogénéisé et rebroyé.
 *% en poids du ciment

Type de ciment	Mélanges étudiés	% NC*	% TEA*	% TIPA*	%FS	%SS	%HS
C2	M10-0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
	M10-1	1	0.00	0.00			
	M10-2	0	0.05	0.00			
	M10-3	1	0.05	0.00			
	M10-4	0	0.10	0.00			
	M10-5	1	0.10	0.00			
	M10-6	0	0.00	0.05			
	M10-7	1	0.00	0.05			
	M10-8	0	0.00	0.10			
	M10-9	1	0.00	0.10			
C2	M11-0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00
	M11-1	1	0.00	0.00			
	M11-2	0	0.05	0.00			
	M11-3	1	0.05	0.00			
	M11-4	0	0.10	0.00			
	M11-5	1	0.10	0.00			
	M11-6	0	0.00	0.05			
	M11-7	1	0.00	0.05			
	M11-8	0	0.00	0.10			
	M11-9	1	0.00	0.10			
C1	M12-0	0	0.00	0.00	0.00	7.50	0.00
	M12-1	1	0.00	0.00			
	M12-2	0	0.05	0.00			
	M12-3	1	0.05	0.00			
	M12-4	0	0.10	0.00			
	M12-5	1	0.10	0.00			
	M12-6	0	0.00	0.05			
	M12-7	1	0.00	0.05			
	M12-8	0	0.00	0.10			
	M12-9	1	0.00	0.10			

Tableau 2.5 (suite)

FS=fumée de silice ; SS= sable siliceux broyé substitué au ciment ; HS= sable siliceux substitué au ciment puis homogénéisé et rebroyé.
 *% en poids du ciment

ANNEXES

Type de ciment	Mélanges étudiés	% NC*	% TEA*	% TIPA*	%FS	%SS	%HS
C1	M13-0	0	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00
	M13-1	1	0.00	0.00			
	M13-2	0	0.05	0.00			
	M13-3	1	0.05	0.00			
	M13-4	0	0.10	0.00			
	M13-5	1	0.10	0.00			
	M13-6	0	0.00	0.05			
	M13-7	1	0.00	0.05			
	M13-8	0	0.00	0.10			
	M13-9	1	0.00	0.10			
C2	M14-0	0	0.00	0.00	0.00	7.50	0.00
	M14-1	1	0.00	0.00			
	M14-2	0	0.05	0.00			
	M14-3	1	0.05	0.00			
	M14-4	0	0.10	0.00			
	M14-5	1	0.10	0.00			
	M14-6	0	0.00	0.05			
	M14-7	1	0.00	0.05			
	M14-8	0	0.00	0.10			
	M14-9	1	0.00	0.10			
C2	M15-0	0	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00
	M15-1	1	0.00	0.00			
	M15-2	0	0.05	0.00			
	M15-3	1	0.05	0.00			
	M15-4	0	0.10	0.00			
	M15-5	1	0.10	0.00			
	M15-6	0	0.00	0.05			
	M15-7	1	0.00	0.05			
	M15-8	0	0.00	0.10			
	M15-9	1	0.00	0.10			

Tableau 2.5 (suite)

FS=fumée de silice ; SS= sable siliceux broyé substitué au ciment ; HS= sable siliceux substitué au ciment puis homogénéisé et rebroyé.
 *% en poids du ciment

ANNEXE 2 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges a base de ciment C1

		Mélanges						
		C1*	C1-1*	C1-2*	C1-3*	C1-4*	C1-5*	C1-6*
		(M1) (100%C1)	(M2) (C1-7.5%FS)	(M3) (C1-10%FS)	(M7) (C1-7.5%HS)	(M8) (C1-10%HS)	(M12) (C1-7.5%SS)	(M13) (C1-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	18	16	14	20	20	16	16
	1%NC	27	16	12	20	22	18	18
	% / Réf	1.50	1.00	0.86	1.00	1.10	1.13	1.13
	0.05%TEA	28	18	12	24	24	16	20
	% / Réf	1.56	1.13	0.86	1.20	1.20	1.00	1.25
	0.10%TEA	36	20	14	32	36	17	21
	% / Réf	2.00	1.25	1.00	1.60	1.80	1.06	1.31
	0.05%TIPA	32	24	19	32	36	18	22
	% / Réf	1.78	1.50	1.36	1.60	1.80	1.13	1.38
	0.10%TIPA	40	29	24	36	32	21	27
	% / Réf	2.22	1.81	1.71	1.80	1.60	1.31	1.69
	1%NC+0.05%TEA	25	20	16	26	24	18	20
	% / Réf	1.39	1.25	1.14	1.30	1.20	1.13	1.25
	1%NC+0.10%TEA	28	22	18	28	32	18	24
	% / Réf	1.56	1.38	1.29	1.40	1.60	1.13	1.50
	1%NC+0.05%TIPA	36	26	22	28	32	20	25
	% / Réf	2.00	1.63	1.57	1.40	1.60	1.25	1.56
	1%NC+0.10%TIPA	52	52	56	68	56	46	40
% / Réf	2.44	2.00	1.93	1.60	1.80	1.50	1.88	
R3j (Mpa)	Réf	25	32	34	36	30	30	28
	1%NC	36	36	40	36	32	32	28
	% / Réf	1.44	1.13	1.18	1.00	1.07	1.07	1.00
	0.05%TEA	36	38	40	32	34	34	30
	% / Réf	1.44	1.19	1.18	0.89	1.13	1.13	1.07
	0.10%TEA	64	42	42	52	56	35	32
	% / Réf	2.56	1.31	1.24	1.44	1.87	1.17	1.14
	0.05%TIPA	48	50	44	40	68	38	34
	% / Réf	1.92	1.56	1.29	1.11	2.27	1.27	1.21
	0.10%TIPA	52	48	50	48	76	44	38
	% / Réf	2.08	1.50	1.47	1.33	2.53	1.47	1.36
	1%NC+0.05%TEA	32	40	42	40	36	38	30
	% / Réf	1.28	1.25	1.24	1.11	1.20	1.27	1.07
	1%NC+0.10%TEA	60	45	45	48	44	40	35
	% / Réf	2.40	1.41	1.32	1.33	1.47	1.33	1.25
	1%NC+0.05%TIPA	48	50	46	60	48	42	36
	% / Réf	1.92	1.56	1.35	1.67	1.60	1.40	1.29

ANNEXES

	1%NC+0.10%TIPA	52	52	56	68	56	46	40
	% / Réf	2.08	1.63	1.65	1.89	1.87	1.53	1.43
R7j (Mpa)	Réf	38	60	56	44	42	40	35
	1%NC	40	64	58	44	40	40	32
	% / Réf	1.05	1.07	1.04	1.00	0.95	1.00	0.91
	0.05%TEA	45	68	58	44	46	42	38
	% / Réf	1.18	1.13	1.04	1.00	1.10	1.05	1.09
	0.10%TEA	76	70	80	64	68	45	42
	% / Réf	2.00	1.17	1.43	1.45	1.62	1.13	1.20
	0.05%TIPA	80	75	78	80	80	46	44
	% / Réf	2.10	1.25	1.39	1.82	1.90	1.15	1.26
	0.10%TIPA	88	60	92	88	88	52	48
	% / Réf	2.32	1.00	1.64	2.00	2.10	1.30	1.37
	1%NC+0.05%TEA	40	72	56	48	44	44	40
	% / Réf	1.05	1.20	1.00	1.09	1.05	1.10	1.14
	1%NC+0.10%TEA	72	82	80	60	64	48	45
	% / Réf	1.89	1.37	1.43	1.36	1.52	1.20	1.29
	1%NC+0.05%TIPA	80	72	85	76	60	50	46
% / Réf	2.10	1.20	1.52	1.73	1.43	1.25	1.31	
1%NC+0.10%TIPA	72	72	80	88	72	56	48	
% / Réf	1.89	1.20	1.43	2.00	1.71	1.40	1.37	
R28j (Mpa)	Réf	60	74	76	65	70	62	64
	1%NC	67	72	70	60	68	60	65
	% / Réf	1.12	0.97	0.92	0.92	0.97	0.97	1.02
	0.05%TEA	70	76	70	60	73	65	68
	% / Réf	1.17	1.03	0.92	0.92	1.04	1.05	1.06
	0.10%TEA	96	78	98	100	104	68	72
	% / Réf	1.60	1.05	1.29	1.54	1.49	1.10	1.13
	0.05%TIPA	96	98	104	96	96	70	74
	% / Réf	1.60	1.32	1.37	1.48	1.37	1.13	1.16
	0.10%TIPA	112	98	100	104	104	76	78
	% / Réf	1.86	1.32	1.32	1.60	1.49	1.23	1.22
	1%NC+0.05%TEA	72	96	78	68	76	68	74
	% / Réf	1.20	1.30	1.03	1.05	1.09	1.10	1.16
	1%NC+0.10%TEA	80	92	95	92	96	72	72
	% / Réf	1.33	1.24	1.25	1.42	1.37	1.16	1.13
	1%NC+0.05%TIPA	88	92	94	100	100	75	76
% / Réf	1.47	1.24	1.24	1.54	1.43	1.21	1.19	
1%NC+0.10%TIPA	96	100	108	104	92	78	78	
% / Réf	1.60	1.35	1.42	1.60	1.31	1.26	1.22	

ANNEXE 3 : Récapitulatif des résistances mécaniques à la compression simple des mélanges a base de ciment C2

		Mélanges						
		C2* (M4) (100%C2)	C2-1* (M5) (C2-7.5%FS)	C2-2* (M6) (C2-10%FS)	C2-3* (M9) (C2-7.5%HS)	C2-4* (M10) (C2-10%HS)	C2-5* (M14) (C2-7.50%SS)	C2-6* (M15) (C2-10%SS)
R1j (Mpa)	Réf	11	20	20	8	12	10	10
	1%NC	9	24	24	11	10	10	10
	% / Réf	0.82	1.20	1.20	1.38	0.83	1.00	1.00
	0.05%TEA	17	28	22	13	14	11	11
	% / Réf	1.54	1.4	1.10	1.63	1.17	1.10	1.10
	0.10%TEA	32	30	24	32	40	12	13
	% / Réf	2.91	1.50	1.20	4.00	3.33	1.20	1.30
	0.05%TIPA	32	30	26	28	28	14	14
	% / Réf	2.91	1.50	1.30	3.50	2.33	1.40	1.40
	1%NC+0.05%TEA	14	30	28	16	13	13	12
	% / Réf	1.27	1.50	1.40	2.00	1.08	1.30	1.20
	1%NC+0.10%TEA	36	32	26	28	36	13	15
	% / Réf	3.27	1.60	1.30	3.50	3.00	1.30	1.50
	1%NC+0.05%TIPA	28	34	30	28	28	16	16
	% / Réf	2.54	1.70	1.50	3.50	2.33	1.60	1.60
	1%NC+0.10%TIPA	36	37	32	36	32	18	18
% / Réf	3.27	1.85	1.60	4.50	2.67	1.80	1.80	
R3j (Mpa)	Réf	17	32	32	19	25	18	18
	1%NC	15	40	40	18	22	16	20
	% / Réf	0.88	1.25	1.25	0.95	0.88	0.89	1.11
	0.05%TEA	25	60	34	22	28	16	22
	% / Réf	1.47	1.88	1.06	1.16	1.12	0.89	1.22
	0.10%TEA	56	62	36	44	52	20	24
	% / Réf	3.29	1.94	1.13	2.32	2.08	1.11	1.33
	0.05%TIPA	48	65	45	60	40	24	25
	% / Réf	2.82	2.03	1.41	3.16	1.60	1.33	1.39
	0.10%TIPA	52	58	40	60	48	25	26
	% / Réf	3.06	1.81	1.25	3.16	1.92	1.39	1.44
	1%NC+0.05%TEA	26	68	40	28	24	17	22
	% / Réf	1.53	2.13	1.25	1.47	0.96	0.94	1.22
	1%NC+0.10%TEA	60	64	42	40	48	22	26
	% / Réf	3.53	2.00	1.31	2.11	1.92	1.22	1.44
	1%NC+0.05%TIPA	48	65	46	48	48	25	28
% / Réf	2.82	2.03	1.44	2.53	1.92	1.39	1.56	
1%NC+0.10%TIPA	56	66	48	60	52	30	30	

ANNEXES

	% / Réf	3.29	2.06	1.50	3.16	2.08	1.67	1.67
R7j (Mpa)	Réf	35	48	48	48	45	24	20
	1%NC	29	60	64	44	34	32	26
	% / Réf	0.83	1.25	1.33	0.92	0.76	1.33	1.30
	0.05%TEA	40	68	60	48	46	30	28
	% / Réf	1.14	1.42	1.25	1.00	1.02	1.25	1.40
	0.10%TEA	76	76	66	56	60	28	34
	% / Réf	2.17	1.58	1.38	1.17	1.33	1.17	1.70
	0.05%TIPA	80	76	62	76	80	36	36
	% / Réf	2.29	1.58	1.29	1.58	1.78	1.50	1.80
	0.10%TIPA	88	64	80	76	76	36	40
	% / Réf	2.51	1.33	1.67	1.58	1.69	1.50	2.00
	1%NC+0.05%TEA	50	76	66	52	48	40	32
	% / Réf	1.43	1.58	1.38	1.08	1.07	1.67	1.60
	1%NC+0.10%TEA	72	75	50	52	56	32	35
	% / Réf	2.06	1.56	1.04	1.08	1.24	1.33	1.75
	1%NC+0.05%TIPA	88	76	72	72	88	36	38
	% / Réf	2.51	1.58	1.50	1.50	1.96	1.50	1.90
1%NC+0.10%TIPA	92	80	82	80	92	38	42	
% / Réf	2.63	1.67	1.71	1.67	2.04	1.58	2.10	
R28j (Mpa)	Réf	50	60	72	64	70	48	45
	1%NC	60	68	76	65	60	62	55
	% / Réf	1.20	1.13	1.06	1.02	0.86	1.29	1.22
	0.05%TEA	62	76	80	72	72	64	58
	% / Réf	1.24	1.27	1.11	1.13	1.03	1.33	1.29
	0.10%TEA	100	82	85	80	76	60	68
	% / Réf	2.00	1.37	1.18	1.25	1.09	1.25	1.51
	0.05%TIPA	100	86	95	100	88	74	72
	% / Réf	2.00	1.43	1.32	1.56	1.26	1.54	1.60
	0.10%TIPA	120	88	92	100	92	75	74
	% / Réf	2.40	1.47	1.28	1.56	1.31	1.56	1.64
	1%NC+0.05%TEA	70	80	90	80	76	64	65
	% / Réf	1.40	1.33	1.25	1.25	1.09	1.33	1.44
	1%NC+0.10%TEA	88	85	92	68	72	72	70
	% / Réf	1.76	1.42	1.28	1.06	1.03	1.50	1.56
	1%NC+0.05%TIPA	104	85	95	88	100	76	75
	% / Réf	2.08	1.42	1.32	1.38	1.43	1.58	1.67
1%NC+0.10%TIPA	120	100	104	100	120	80	76	
% / Réf	2.40	1.67	1.44	1.56	1.71	1.67	1.69	

Résumé

La prévision de la résistance à court terme du béton est essentielle dans le domaine du génie civil. En effet la confection d'un béton ayant la meilleure résistance mécanique possible au jeune âge est nécessaire pour répondre aux impératifs de construction actuels (décoffrage rapide, mise en précontrainte le plus tôt possible, bétonnage par temps froid,....). Le développement de tels bétons passe, en général par l'utilisation d'adjuvants associés à des additions minérales pouzzolaniques parmi lesquelles la fumée de silice. Or ce sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages ferro-siliceux devient onéreux du fait de sa capacité limitée de production dans les pays industrialisés mais reste inexistant dans certains d'autres pays.

Dans ce travail de recherche, nous proposons d'autres substituts à la fumée de silice associés à des techniques de substitution particulières. En parallèle, nous proposons l'introduction, d'une combinaison d'adjuvants accélérateurs de prise-accélérateurs de durcissement afin de répondre aux objectifs d'améliorer des temps de prise et de durcissement du béton ainsi que de sa résistance mécanique au jeune âge.

Nos résultats montrent que l'utilisation d'alcanolamines combinées au nitrate de calcium dans des mélanges cimentaires comportant du sable siliceux broyé et homogénéisé avec le ciment conduit à une amélioration considérable des résistances mécaniques à toutes les échéances notamment aux très jeune âges (1 et 3 jours) et apporte une réduction importante des temps de prise. Nos résultats montrent que les performances obtenues dépendent également du type de ciment utilisé notamment de sa composition en ferro-aluminates.

Abstract

Predicting the short-term strength of concrete is essential in the field of civil engineering. To meet some building requirements (quick formwork removal, earlier prestressing, concreting in cold weather ...), it is necessary to make concrete that has the best possible mechanical strength at a young age. The development of this type of concrete requires generally the use of admixtures associated with pozzolanic mineral additions such as silica fume. However this by-product, from the silicon and silica-ferrites alloys industry, still has a high cost owing to its limited production in the industrialised countries and non-availability in the others countries.

In this research work, we propose others substitutes to silica fume and the use of special substitution techniques. In addition, combinations of setting and hardening accelerators are considered so as to improve both setting and hardening concrete time as well as the mechanical strength at early age.

The results obtained show that the use of alkanolamine combined with calcium nitrate in cement mixes containing siliceous sand grinded and homogenised with cement produced a significant improvement in the mechanical strength at all stages particularly in the early ages (1 and 3 days) and also provided an important reduction in the setting time. Our results indicate that these performances are also dependant on the type of cement used mainly its alumino-ferrites composition.

ملخص:

التنبأ بمقاومة الخرسانة على المدى القصير أمر مهم في ميدان الهندسة المدنية. بالفعل، إن عملية إنجاز خرسانة ذات أحسن مقاومة ميكانيكية ممكنة في بداية العمر ضرورية لتلبية المتطلبات الحالية للبناء (سرعة نزع القوالب، تطبيق الإجهاد في أقرب وقت ممكن، صب الخرسانة في الطقس البارد،...). إن عملية تطوير هذا النوع من الخرسانة يتطلب في الغالب استعمال معززات مشتركة بإضافات من المعادن البزلونية مثل دخان الصوان. لكن هذا المنتج من صناعة السيليسيوم و المزيج من فيرو-سيليس أصبح باهظ الثمن لقلة إنتاجه بالبلدان الصناعية و عدم وجوده بالبلدان الأخرى.

يتضمن هذا البحث اقتراحات لبدائل عن دخان الصوان بالإضافة إلى تقنيات خاصة لعملية التعويض. بالموازاة، نقترح كذلك إدخال معززات مسرعة الإمساك و مسرعة التجمد لتلبية متطلبات تحسين وقت الإمساك و التجمد للخرسانة إلى جانب المقاومة الميكانيكية في الأطوار الأولى من العمر.

النتائج المتحصل عليها تظهر بأن استعمال الألكولامين بالتنسيق مع النترات للكلسيوم في خلطات إسمنتية تتضمن رمل سيليسي مطحون و متجانس يؤدي إلى تحسن هائل في كل أطوار المقاومة الميكانيكية و خاصة في المدى القريب (1- 3 أيام) مع تخفيض مهم لوقت الإمساك. تبين النتائج المتحصل عليها ارتباطها بنوعية الإسمنت المستعمل خاصة بنسبة مكونه من الفيرو-ألومينات.