

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE

Faculté des Sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

N° Ordre :

N° Série :

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat d'état
en Génie Civil

**UTILISATION DES ADDITIONS MINERALES ET DES ADJUVANTS
FLUIDIFIANTS POUR L'AMELIORATION DES PROPRIETES
RHEOLOGIQUES ET MECANIQUES DES BETONS**

Par

BOUDCHICHA Abdelaziz

Devant le Jury

Président :	Pr. HOUARI H.	U. Mentouri Constantine
Rapporteur :	Dr. MEZGHICHE Bouzidi	U. de Biskra
Examineur :	Pr. MIMOUNE M.	U. Mentouri Constantine
	Pr. BELACHIA M.	U. de Skikda
	Dr. BENMALEK M. L.	U. de Guelma

Soutenue le 17/12/ 2007

Remerciements

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse.

A mon Directeur de thèse, qui a su attiser en moi l'intérêt et l'amour pour la science des matériaux de construction.

Aux membres de jury pour avoir sacrifié de leur temps, accepter d'examiner cette thèse et d'honorer par leur présence le jury de soutenance.

A mon ami et frère, Nabil, pour avoir été présent auprès de moi dans les moments les plus difficiles, de m'avoir conseiller et encourager pour concrétiser ce travail. Merci pour ton amitié, ta sincérité et ton dévouement pour les autres.

Dédicaces

A mes parents, pour tout

*A ma femme, pour son dévouement, sa patience et sa grande
disponibilité, Merci pour tout.....*

*A mes enfants chéris, Alaa, Ziad et Manar, que dieu les garde
et fasse qu'ils réussissent mieux que leur père.*

SOMMAIRE

SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	XVII
INTRODUCTION	1
Chapitre I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. ADDITIONS MINERALES	5
I.1. DEFINITION DES ADDITIONS	5
I.2. ADDITIONS CALCAIRES	5
I.3. ADDITIONS SILICEUSES	5
I.4. FUMEE DE SILICE	6
I.5. CENDRES VOLANTES POUR BETON	6
I.6. LAITIER VITRIFIE MOULU DE HAUT FOURNEAU	6
II. ACTION DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES	7
II.1. EFFET GRANULAIRE	7
II.2. EFFET PHYSICO-CHIMIQUE ET MICROSTRUCTURAL	12
II.3. EFFET CHIMIQUE	16
III. UTILISATION DES ADDITIONS MINERALES DANS LA FORMULATION DES BETONS	22
III.1. METHODES DE FORMULATION DES BETONS SANS ADDITIONS	22
III.2. POINT DE VUE DE LA NORMALISATION SUR LA PRISE EN COMPTE DES ADDITIONS DANS LA FORMULATION DES BETONS	23
III.3. POINT DE VUE DES ETUDES RECENTES SUR LA PRISE EN COMPTE DES ADDITIONS DANS LA FORMULATION DES BETONS	25
IV. ADJUVANTS PLASTIFIANTS REDUCTEURS D'EAU	31
IV.1. DEFINITION	31
IV.2. DESCRIPTION	31
IV.3. MECANISMES D'ACTION	32
IV.4. INFLUENCE DU DOSAGE EN PLASTIFIANT	34
V. ADJUVANTS SUPERPLASTIFIANTS HAUTS REDUCTEURS D'EAU	36
V.1. DEFINITION	36

V.2. DESCRIPTION	36
V.2. MECANISMES D'ACTION	38
V.4. INFLUENCE DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT	41
VI. SYNTHESE	51

Chapitre II : METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

I. PRINCIPES DE LA METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	55
II. CONFECTION DU MORTIER DE REFERENCE	58
III. MORTIERS AVEC ADDITIONS SANS ADJUVANTS	60
III.1. BESOIN EN EAU, COMPACITE ET VOLUME D'AIR OCCLUS DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	60
III.2. RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS MINERALES ...	61
III.3. EFFETS DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MORTIERS AVEC ADDITIONS ...	62
IV. MORTIERS AVEC ADDITIONS ET ADJUVANTS FLUIDIFIANTS	65
IV.1. BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	65
IV.2. RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET ADJUVANTS FLUIDIFIANTS	67
IV.3. ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS DANS LES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET ADJUVANTS SUPERPLASTIFIANTS	67
V. ESSAIS SUR LES BETONS	68
V. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	69
V.1. CIMENT	70
V.2. SABLE	71
V.3. ADDITIONS MINERALES	71
V.5. ADJUVANTS	73

Chapitre III : CARACTERISATION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A L'ETAT FRAIS

I. INTRODUCTION	74
II. CONFECTION DES MORTIERS DE REFERENCE	75
III. BESOIN EN EAU DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	76
IV. COMPACITE DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	80
V. VOLUME D'AIR OCCLUS DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	81

VI. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A L'ETAT FRAIS	82
VI.1. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LE BESOIN EN EAU DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	82
VI.2. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA COMPACITE DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	84
VI.3. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LE VOLUME D'AIR OCCLUS DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	86
VII. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A L'ETAT FRAIS	87
VII.1. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS SUR LE BESOIN EN EAU DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	88
VII.2. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS SUR LA COMPACITE DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	89
VIII. SYNTHESE	90

Chapitre IV : RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

I. INTRODUCTION	93
II. RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	93
III. RESISTANCES A LA TRACTION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS...	98
IV. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	103
V. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	105
VI. SYNTHESE	108

Chapitre V : EFFETS DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MORTIERS SANS ADJUVANTS

I. GENERALITES	110
I.1 INTRODUCTION	110
I.2. PRINCIPES D'EVALUATION DES EFFETS DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MORTIERS	114
II. MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS EFFETS DES ADDITIONS AGISSANT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS	116

II.1. EXPRESSION DES RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS EN FONCTION DES FACTEURS DE COMPACITE	116
II.2. EXPRESSION DES RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION DES FACTEURS DE COMPACITE	118
III. ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS MINERALES	121
III.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 07 JOURS	122
III.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 28 JOURS	123
IV. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES FACTEURS D'ACTIVITES CHIMIQUES	128
V. INFLUENCE DU MODELE PREDICTIF DE RESISTANCE SUR LE CALCUL DES FACTEURS D'ACTIVITES DES ADDITIONS	130
VI. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LES FACTEURS D'ACTIVITES	132
VII. SYNTHESE	133
Chapitre VI : ACTIONS DES ADJUVANTS SUPERPLASTIFIANTS SUR LES MORTIERS AVEC ADDITIONS	
I. INTRODUCTION	137
II. EFFICACITE DE L'ADJUVANT SUPERPLASTIFIANT	138
III. CONFECTION DU MORTIER DE REFERENCE	140
IV. BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	144
V. INFLUENCE DE LA NATURE DU SUPERPLASTIFIANT SUR LE BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	149
VI. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LE BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	152
VII. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LE BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS	155
VIII. SYNTHESE	157
Chapitre VII : RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET SUPERPLASTIFIANTS	
I. RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET SUPERPLASTIFIANTS	160
II. INFLUENCE DE LA NATURE DU SUPERPLASTIFIANT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION	165
III. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION	170

IV. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION	173
V. CORRELATION DES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC SUPERPLASTIFIANTS ET SANS SUPERPLASTIFIANTS	177
V.1. RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS	177
V.2. RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS	180
VI. EVALUATION DE L'APPORT DES ADDITIONS ET DES SUPERPLASTIFIANTS POUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS	184
VI.1. RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS	185
VI.2. RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS	188
V. SYNTHESE	192
Chapitre VIII : ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS DANS LES MORTIERS AVEC SUPERPLASTIFIANTS	
I. INTRODUCTION	195
II. ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS MINERALES DANS LES MORTIERS AVEC SUPERPLASTIFIANTS	196
II.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 07 JOURS	196
II.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 28 JOURS	198
III. INFLUENCE DE LA NATURE DU SUPERPLASTIFIANT SUR LES FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS	202
III.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 07 JOURS	202
III.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 28 JOURS	206
IV. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES FACTEURS D'ACTIVITES DES ADDITIONS	211
V. INFLUENCE DU MODELE PREDICTIF DE RESISTANCE SUR LE CALCUL DES FACTEURS D'ACTIVITES DES ADDITIONS	214
VI. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LES FACTEURS D'ACTIVITES CHIMIQUES	217
VII. CORRELATION DES FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS DANS LES MORTIERS AVEC ET SANS SUPERPLASTIFIANTS	219
VII.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS CALCULES À PARTIR MODELE DE RESISTANCE DE FÉRET	219
VII.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS CALCULES À PARTIR MODELE DE RESISTANCE DE BOLOMEY	222
VIII. SYNTHESE	226

Chapitre IX : UTILISATION DES ADDITIONS MINERALES ET DES SUPERPLASTIFIANTS DANS LES BETONS	229
I. INTRODUCTION	229
II. CONFECTION DES BETONS DE REFERENCE	230
III. BESOIN EN EAU DES BETONS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	232
IV. BESOIN EN ADJUVANT DES BETONS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE	235
V. RESISTANCES EN COMPRESSION DES BETONS AVEC ADDITIONS ET SUPERPLASTIFIANTS	239
VI. APPORT DES ADDITIONS ET DES SUPERPLASTIFIANTS POUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES BETONS	242
VI.1. RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS	243
VI.1. RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS	245
VII. SYNTHESE	247
CONCLUSION GENERALE	250
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	254
REFERENCES	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes dans une formulation de béton selon Lewandowski [15]	8
Figure I.2 : Variation du rapport eau/liant des bétons à même ouvrabilité en fonction de la teneur en additions quartzeuses selon Kronlof [20]	9
Figure I.3 : Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant selon Kwan [21]	9
Figure I.4 : Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon De Larard et al [22]	10
Figure I.5 : Besoin en eau des pâtes de ciments II en fonction de la proportion d'additions minérales, selon Gallias et al [25]	11
Figure I.6 : Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvants en fonction du dosage en additions minérales selon Bessa [7]	11
Figure I.7 : Formation d'hydrates au cours des premières 24 heures en fonction du pourcentage d'additions employées selon Lilkov [26]	12
Figure I.8 : Variation de la quantité de chaleur dégagée en fonction de la teneur en fumée de silice selon Hanna [27]	13
Figure I.9 : Degré d'hydratation des mortiers contenant des additions de quartz selon Lawrence & al [4]	13
Figure I.10 : Surplus d'hydratation du ciment dans des mortiers avec additions de quartz en fonction de la quantité et la finesse des particules selon Cyr & al [8]	14
Figure I.11 : Expansion d'un mortier standard contenant des pouzzolanes ou laitier, conservé à 95°C, selon Ramlochan & al [29]	15
Figure I.12 : Variation des résistances en compression des pâtes cimentaires en fonction de la teneur en CaCO_3 à différentes échéances selon Husson [37]	16
Figure I.13 : Variation des résistances en compression des mortiers en fonction du temps d'hydratation pour différents teneurs en fumée de silice pour un rapport eau/liant de 0.5, selon Appa Rao [38]	17
Figure I.14 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon Kwan [21]	17
Figure I.15 : Evolution de la résistance en compression pour les mortiers avec additions de finesse équivalente, en fonction du taux de substitution du ciment, selon Lawrence & al [9]	18
Figure I.16 : Décomposition de la résistance en compression en fractions dues aux effets physiques et chimiques de l'addition minérale, selon Cyr & al [5]	19

Figure I.17 : Résistance en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers contenant des additions de quartz et de cendres volantes de même finesse par rapport à une addition de référence avec effet de dilution seul, selon Cyr & al [5]	20
Figure I.18 : Amélioration de la résistance en compression Δf_{ϕ} à 07 jours et 28 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz, selon Cyr & al [5]	20
Figure I.19 : Amélioration de la résistance en compression Δf_{ϕ} à 07 jours et 28 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz, selon Cyr & al [5]	21
Figure I.20 : Variation du facteur d'efficacité k de deux cendres volantes (FA1 et FA2) et d'une addition calcaire (L) en fonction de l'âge du mortier, selon Cyr et al [12]	27
Figure I.21 : Variation de la résistance relative des mortiers avec différentes additions en fonction du rapport E/C selon Kara Ali [11]	27
Figure I.22 : Effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance en compression des ciments durcis à l'état naturel selon Houhou et Mezghiche [54]	29
Figure I.23 : Quantité d'eau et résistances en compression en fonction de la surface spécifique Blaine selon Belhachemi [55]	30
Figure I.24 : Développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge selon Aichouba et al [56]	31
Figure I.25 : Formules chimiques développées des principales molécules organiques entrant dans la composition des réducteurs d'eau selon keijger [58].	32
Figure I.26 : Floc de ciment en l'absence de réducteur d'eau selon Rixom et Mailvaganam, [59]	33
Figure I.27 : Mode d'action des molécules des réducteur d'eau suivant leur nature ionique selon keijger, [58]	33
Figure I.28 : Influences du dosage en réducteur d'eau (a), de la teneur en C_3A (b), de la teneur totale en alcalins (c) et du dosage en ciment (d), sur le pourcentage de réduction d'eau selon Dodson [60]	34
Figure I.29 : Influence du plastifiant sur la viscosité apparente et l'hydratation de l'ettringite, selon Emoto et Bier [64]	35
Figure I.30 : Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de sels de sodium de poly-naphtalène sulfoné selon Rixom et Mailvaganam [59]	36
Figure I.31 : Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de polymélamine sulfoné selon Dodson, [60]	36
Figure I.32 : Illustration schématique du blocage des sites réactifs par les molécules d'un superplastifiant selon Jolicoeur et al [65]	37

Figure I.33 : Illustration schématique de l'influence des superplastifiants sur la formation des hydrates selon Fernon [66]	37
Figure I.34 : Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant selon Meyer [67]	38
Figure I.35 : Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m ³ de ciment à maniabilité constante selon Meyer [67]	38
Figure I.36 : Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule selon Jolicoeur et al [65]	39
Figure I.37 : Illustration schématique de la répulsion électrostatique entre deux particules selon Jolicoeur et al [65]	39
Figure I.38 : Représentation schématique du phénomène de répulsion entropique ou stérique selon Jolicoeur et al [65]	40
Figure I.39 : Evolution de l'affaissement d'un BHP à bas de deux types de ciment en fonction du temps pour 3 superplastifiants différents, selon kadri [44]	42
Figure I.40 : Réduction du besoin en eau des mortiers à base de CEM IIA- additions à maniabilité constante par l'adjuvant fluidifiant à base de poly-mélamine en fonction de la teneur relative en additions selon Kara Ali [6]	43
Figure I.41 : Variation du dosage en adjuvant fluidifiant des différentes séries de mortier en fonction du dosage en addition, selon Bessa [7]	44
Figure I.42 : Influence de la surface BET des additions sur la modification du besoin en adjuvant des mortier selon Bessa [7]	44
Figure I.43 : Gain en résistance en fonction de la quantité de superplastifiant pour trois type de ciment, selon Erdogdu [78]	45
Figure I.44 : Variation de l'affaissement, densité du mélange frais et volume d'air occlus en fonction de la teneur en superplastifiant et de la teneur en eau selon Chandra et Bjornstrom [79]	45
Figure I.45 : Relation contrainte de cisaillement – rapport de cisaillement des pâtes de ciment avec 1 % de superplastifiant MFS (a) et NFS (b), à différents temps d'introduction, selon Aiad [80]	46
Figure I.46 : Variation de la porosité (a) et de la résistance en compression (b), des pâtes de ciment avec addition de pouzzolane naturelles avec ou sans superplastifiant selon Çolak [81]	47
Figure I.47 : Influence du rapport E/C et le dosage en superplastifiant à bases de polycarboxylate (a) et naphthalène (b), sur les propriétés rhéologiques des mortiers après 50 min du début du malaxage selon Golaszewski et Szwabowski [82]	48
Figure I.48 : Comparaison des propriétés rhéologiques en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition minérale selon Park et al [83]	48

Figure I.49 : Mécanismes de dispersions des superplastifiants traditionnels et nouveaux selon Corradi et al [84]	49
Figure I.50 : Représentation schématique de la section transversale d'un grain de ciment hydraté montrant la distribution inégale d'un polymère sur sa surface selon Plank et Hirsch [85]	49
Figure I.51 : Résultats d'adsorption pour le ciment pour le ciment C et D, selon Magratto et al [86]	50
Figure I.52 : Degré d'hydratation de l'alite et du C ₃ A et volume des pores dans un ciment portland avec différents types de superplastifiants selon Sakai et al [88]	50
Figure II.1 : Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais	59
Figure II.2 : Schéma du dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de mortiers	59
Figure II.3 : Schéma du dispositif de charge en compression pour les éprouvettes de mortiers	59
Figure II.4 : Mise en évidence des effets des additions minérales sur les résistances des mortiers	63
Figure III.1 : Variation de l'étalement sur la table à secousses des mortiers C1 et mortiers C2, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	77
Figure III.2 : Variation du besoin en eau des mortiers C1 et C2 à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions	78
Figure III.3 : Variation de la compacité des mortiers C1 et C2 à l'état frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	81
Figure III.4 : Variation du volume d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 à l'état frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par les additions ..	82
Figure III.5 : Corrélation entre les besoins en eau des mortiers C1 et C2 avec additions, à même consistance	83
Figure III.6 : Variation des besoins en eau des mortiers C1 et C2 $\Delta e(C1-C2)$, à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions ...	84
Figure III.7 : Corrélation entre les compacités des mortiers C1 et C2 avec additions, à même consistance	85
Figure III.8 : Variation des compacités des mortiers C1 et C2 $\Delta c(C1-C2)$, à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions	85
Figure III.9 : Corrélation entre les volumes d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 avec additions, à même consistance.....	86
Figure III.10 : Variation des volumes d'air occlus des mortiers C1 et C2 $\Delta v_a(C1-C2)$, à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	87

Figure III.11 : Variation du besoin en eau des mortiers C1 et mortiers C2 en fonction de la finesse des additions.....	88
Figure III.12 : Variation de la compacité des mortiers C1 et mortiers C2 frais en fonction de la finesse Blaine des additions	89
Figure IV.1 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	93
Figure IV.2 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	94
Figure IV.3 : Variation des résistances relatives en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	94
Figure IV.4 : Variation des résistances relatives en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	95
Figure IV.5 : Variation des résistances à la traction à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	99
Figure IV.6 : Variation des résistances à la traction à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	99
Figure IV.7 : Variation de la résistance relative à la traction à 7 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition... ..	100
Figure IV.8 : Variation de la résistance relative à la traction à 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.. ..	101
Figure IV.9 : Corrélation des résistances en compression et des résistances à la traction à 07 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions.....	102
Figure IV.10 : Corrélation des résistances en compression et des résistances à la traction à 28 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions.....	102
Figure IV.11 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 et 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	103
Figure IV.12 : Variation des résistances en compression $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ et $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment	104
Figure IV.13 : Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction de la finesse Blaine.....	106
Figure IV.14 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction de la finesse Blaine.....	107
Figure V.1 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Féret	117
Figure V.2 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Bolomey	117

Figure V.3 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Féret	118
Figure V.4 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Bolomey	119
Figure V.5 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés à partir du modèle de Féret, en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2.....	122
Figure V.6 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey, en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2.....	123
Figure V.7 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de Féret, en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2	124
Figure V.8 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey, en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2.....	124
Figure V.9 : Corrélation (C1/C2), des facteurs d'activité des additions à 28 jours, pour les modèles de Féret (K_F) et de Bolomey (K_B)	128
Figure V.10 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les modèles de Féret et de Bolomey.....	129
Figure V.11 : Corrélation (K_B/K_F) des facteurs d'activités des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 avec additions.....	130
Figure V.12 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Bolomey (K_B) et de Féret (K_F) dans les mortiers C1 et C2 avec additions.....	131
Figure V.13 : Variation des facteurs d'activité à 28 jours des additions, dans les mortiers C1 et mortiers C2, pour le modèle de résistance de Féret	132
Figure VI.1 : Variation du besoin en eau des mortiers de référence C1 et C2 sans additions à même consistance en fonction de la quantité d'adjuvants superplastifiants SP1 et SP2.....	138
Figure VI.2 : Réduction du besoin en eau par les adjuvants superplastifiants SP1 et SP2, des mortiers de référence C1 et C2 sans additions à même quantité d'eau	142
Figure VI.3 : Variation du dosage en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment	144
Figure VI.4 : Variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment	145

Figure VI.5 : Efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP1 dans les mortiers C1 et C2 avec additions	147
Figure VI.6 : Variation du dosage en adjuvant SP2 des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment	149
Figure VI.7 : Variation du besoin en adjuvant SP2 des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment.....	150
Figure VI.8 : Corrélation entre les dosages en adjuvant SP2 et SP1 des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance	151
Figure VI.9 : Efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP2 dans les mortiers C1 et C2 avec additions	151
Figure VI.10 : corrélation entre les besoins en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2.....	153
Figure VI.11 : Variation du dosage en adjuvant $\Delta A(C1-C2)$, des mortiers C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	154
Figure VI.12 : Variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 en fonction de la finesse des additions.....	155
Figure VI.13 : Variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 en fonction de la finesse des additions.....	156
Figure VII.1 : Variation de la résistance en compression à 7 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	161
Figure VII.2 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	161
Figure VII.3 : Variation de la résistance relative à 7 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	162
Figure VII.4 : Variation de la résistance relative à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	162
Figure VII.5 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions en fonction du taux de substitution du ciment	166
Figure VII.6 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	166
Figure VII.7 : Variation de la résistance relative à 7 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	167
Figure VII.8 : Variation de la résistance relative à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	168
Figure VII.9 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2.....	169

Figure VII.10 : Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2.....	169
Figure VII.11 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2	170
Figure VII.12 : Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2.....	170
Figure VII.13 : Variation de la résistance en compression à 7 jours $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ des mortiers C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	171
Figure VII.14 : Variation de la résistance en compression à 28 jours $\Delta R_{C28}(C1-C2)$ des mortiers C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	172
Figure VII.15 : Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 en fonction de la finesse Blaine.....	174
Figure VII.16 : Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 en fonction de la finesse Blaine.....	174
Figure VII.17 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 en fonction de la finesse Blaine.....	175
Figure VII.18 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 en fonction de la finesse Blaine.....	176
Figure VII.19 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1.....	177
Figure VII.20 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP2	177
Figure VII.21 : variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP1, $\Delta R_{C7}(SP-SSP)$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	179
Figure VII.22 : variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP2, $\Delta R_{C7}(SP-SSP)$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	179
Figure VII.23 : Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1	181
Figure VII.24 : Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP2.....	181
Figure VII.25 : variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP1, $\Delta R_{C28}(SP-SSP)$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	183

Figure VII.26: variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP2, $\Delta R_{C28}(SP-SSP)$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	183
Figure VII.27: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours des mortiers C1.....	186
Figure VII.28: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours des mortiers C2.....	187
Figure VII.29: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 28 jours des mortiers C1.....	189
Figure VII.30: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 28 jours des mortiers C2.....	190
Figure VIII.1 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Féret	197
Figure VIII.2 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Bolomey	197
Figure VIII.3 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Féret	199
Figure VIII.4 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Bolomey	199
Figure VIII.5 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Féret.....	202
Figure VIII.6 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Bolomey.....	203
Figure VIII.7 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 07 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Féret	204
Figure VIII.8 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 07 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Bolomey	204
Figure VIII.9: Variation des facteurs d'activité des additions à 7 jours $\Delta K_{F7}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Féret	205

Figure VIII.10: Variation des facteurs d'activité des additions à 7 jours $\Delta K_{B7}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Bolomey	205
Figure VIII.11 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Féret.....	206
Figure VIII.12: Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Bolomey.....	207
Figure VIII.13 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Féret	209
Figure VIII.14 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Bolomey	209
Figure VIII.15 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Féret	210
Figure VIII.16: Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours $\Delta K_{B28}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Bolomey	211
Figure VIII.17 : Corrélation (C1/C2), des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2, avec superplastifiants SP1 et SP2, pour le modèle de résistance de Féret	212
Figure VIII.18 : Corrélation (C1/C2), des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2, avec superplastifiants SP1 et SP2, pour le modèle de résistance de Bolomey.....	212
Figure VIII.19 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour le modèle de Féret	213
Figure VIII.20 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour le modèle de Bolomey.....	213
Figure VIII.21 : Corrélation (K_B/K_F), entre les facteurs d'activités chimiques des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Féret et de Bolomey dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP1.....	215

Figure VIII.22 : Corrélation (K_B/K_F), entre les facteurs d'activités chimiques des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Féret et de Bolomey dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2.....	215
Figure VIII.23 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta(K_{B28}-K_{F28})$, dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP1.....	216
Figure VIII.24 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta(K_{B7}-K_{F7})$, dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2.	216
Figure VIII.25 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 et superplastifiant SP1, pour le modèle de résistance de Féret	218
Figure VIII.26 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 et superplastifiant SP2, pour le modèle de résistance de Féret	218
Figure VIII.27: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiant, pour le modèle de Féret.....	220
Figure VIII.28: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiant, pour le modèle de Féret.....	220
Figure VIII.29 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Féret, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiants.....	221
Figure VIII.30 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Féret, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiants.....	222
Figure VIII.31: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiant, pour le modèle de Bolomey.....	223
Figure VIII.32: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiant, pour le modèle de Bolomey.....	224
Figure VIII.33 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Bolomey, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiants.....	225
Figure VIII.34 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Bolomey, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiants.....	225
Figure IX.1 : Variation de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions	232

Figure IX.2 : Variation du besoin en eau des bétons C1 et C2 à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions	233
Figure IX.3 : Réduction du besoin en eau par l'adjuvant superplastifiant SP1, dans les bétons C1 et C2 sans additions à même quantité d'eau	236
Figure IX.4 : Variation du dosage en adjuvant des bétons C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment	237
Figure IX.5 : Variation du besoin en adjuvant des bétons C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment	238
Figure IX.6 : Variation de la résistance en compression à 7 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	240
Figure IX.7 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	240
Figure IX.8 : Variation de la résistance relative à 07 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	241
Figure IX.9 : Variation de la résistance relative à 28 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	241
Figure IX.10: Apport des additions (Ca3, Pz2 et La) et du superplastifiants SP1 aux résistances en compression à 07 jours des bétons C1 (a) et C2 (b)	244
Figure IX.11: Apport des additions (Ca3, Pz2 et La) et du superplastifiants SP1 aux résistances en compression à 28 jours des bétons C1 (a) et C2 (b)	246

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Valeur du coefficient k pour les bétons utilisés en France	24
Tableau II.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des ciments.....	70
Tableau II.2 : Composition chimique des ciments.....	70
Tableau II.3 : Composition minéralogique du clinker de base selon Bogue.....	71
Tableau II.4 : Caractéristiques physiques du sable.....	71
Tableau II.5 : Granulométrie du sable utilisé.....	71
Tableau II.6 : Caractéristiques physiques des additions minérales.....	72
Tableau II.7 : Compositions chimiques des additions minérales.....	72
Tableau II.8 : Caractéristiques des superplastifiants utilisés.....	72
Tableau III.1 : Résultats des mortiers de référence à bases des ciments C1 et C2 ...	73
Tableau VI.1 : Résultats des mortiers de référence C1 et C2 avec superplastifiants ...	140
Tableau VI.2 : Droites d'efficacité du superplastifiant SP1 pour les différents mortiers C1 et C2 avec additions	148
Tableau VI.3 : Droites d'efficacité du superplastifiant SP2 pour les différents mortiers C1 et C2 avec additions	152
Tableau IX.1 : Compositions et résultats des bétons de référence à bases des ciments C1 et C2.	231
Tableau IX.2 : Résultats des bétons C1 et C2 sans additions avec superplastifiant SP1.	235

INTRODUCTION

Les développements récents dans le domaine du béton montrent que l'incorporation conjuguée d'adjuvants fluidifiants et d'additions minérales fines (diamètre moyen inférieur à 100 μm) et ultrafines (diamètre moyen inférieur à 5 μm) conduit, généralement, à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation consécutive de la compacité du matériau. Ainsi, des améliorations très significatives des performances mécaniques, physiques et de durabilité des bétons peuvent être obtenues caractérisant une catégorie spécifique de matériaux que l'on appelle les bétons à hautes et à très hautes performances.

Toutefois, la course aux performances dans le domaine du béton n'a pas été suivie par un approfondissement équivalent des connaissances sur le rôle des additions minérales et des adjuvants fluidifiants dans les mélanges cimentaires. Les formulations des bétons à hautes et très hautes performances résultent pour l'essentiel d'une approche empirique basée sur des tâtonnements en laboratoire et de ce fait, plusieurs échecs ont été essuyés lors de la mise en oeuvre de ces bétons sur chantier. Par ailleurs, l'absence d'une méthodologie de formulation rationnelle empêche une optimisation des quantités relatives des différents constituants entraînant le plus souvent des surcoûts préjudiciables. Dans ce contexte, l'utilisation pratique des bétons à hautes et très hautes performances n'a pu obtenir qu'une part relativement marginale dans le marché global du béton. De plus, les transferts technologiques vers les bétons courants ont été sensiblement limités.

En proposant d'étudier l'utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons nous souhaitons contribuer à dégager des règles pour la maîtrise de cette utilisation sur des bases rationnelles. Car, outre la réponse aux besoins technologiques évidents, l'utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants dans les mélanges cimentaires constitue aussi un enjeu économique et un déficit scientifique pertinent.

En effet, l'incorporation des additions minérales dans le squelette d'un mélange granulaire ne peut pas s'appuyer sur les méthodes classiques d'optimisation de l'empilement granulaire (Valette, Faury, Dreux-Gorisse, ...) utilisées pour la détermination des quantités des granulats nécessaires pour la formulation des bétons courants. La petite dimension des particules des additions les rend beaucoup plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide. Des phénomènes de floculation des particules peuvent apparaître ainsi que des interactions fortes avec les grains de ciment anhydres et les premiers produits hydratés. L'efficacité de la dispersion des particules par les adjuvants fluidifiants n'est que partielle, elle dépend de la nature et de la quantité relative ciment - addition minérale employée dans la formulation. Le comportement rhéologique des

mélanges avec additions minérales et adjuvants fluidifiants s'écarte sensiblement des modèles rhéologiques considérés pour les bétons courants.

Par ailleurs, les particules minérales peuvent réagir chimiquement avec la matrice cimentaire pour former des produits similaires à ceux résultant de l'hydratation du ciment. Ainsi, les additions de nature siliceuse peuvent présenter une plus ou moins grande activité pouzzolanique alors que les additions calcaires peuvent réagir avec la phase alumineuse du ciment.

L'enjeu économique de cette recherche est également très important. L'utilisation des additions minérales dans le béton permettra de valoriser en grande quantité une catégorie de matériaux naturels ou co-produits industriels qui en raison de leur nature pulvérulente ne le sont pas assez actuellement. De plus, la maîtrise de l'utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants permettra à l'industrie du béton de proposer une gamme de formulations mieux adaptées aux besoins de l'utilisateur assurant ainsi des meilleures performances aussi bien pour l'exécution que pour l'exploitation des ouvrages en béton du génie civil.

Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, l'approche du sujet sera essentiellement expérimentale.

Le travail de recherche visera, à utiliser une méthodologie expérimentale spécifique, capable de dégager la liaison entre les propriétés intrinsèques des additions minérales (finesse, caractéristiques morphologiques et texturales, nature minéralogique,...) et les modifications apportées sur les propriétés macroscopiques des mélanges cimentaires frais et durcis. L'action des adjuvants fluidifiants sera évaluée essentiellement par leur influence sur le couple consistance - quantité d'eau de gâchage. Afin de faciliter les issues pratiques de ce travail de recherche, la méthodologie choisie respectera les impératifs du chantier de construction, à savoir une consistance du mélange frais adaptée aux conditions de mise en oeuvre ainsi qu'une résistance mécanique du mélange durci garantissant la stabilité et la pérennité de l'ouvrage. Dans le même objectif, un poids particulier sera donné aux additions minérales à faible coût, en particulier, celles issues de la transformation de matériaux locaux. Le travail expérimental sera appuyé essentiellement sur des essais normalisés, destinés à caractériser les propriétés rhéologiques des mélanges cimentaires frais et l'évolution des caractéristiques mécaniques des mélanges durcis.

Le travail de recherche approfondira les mécanismes de dispersion des particules des additions dans les mélanges frais en présence ou non d'adjuvants fluidifiants et en fonction des conditions de malaxage. L'étude comprendra la caractérisation de l'empilement granulaire et l'évaluation de l'activité chimique des additions minérales en milieu cimentaire afin d'apprécier leur implication dans l'amélioration des propriétés mécaniques.

Les résultats obtenus doivent, d'une part, déterminer le rôle des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur la structure et les propriétés des bétons et, d'autre part apporter quelques éléments scientifiques pour la définition d'une méthodologie de formulation avec additions minérales et adjuvants fluidifiants afin de permettre une optimisation de leur utilisation pour l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons.

Afin de répondre aux objectifs fixés, le travail de recherche sera échelonné en trois étapes principales :

- Etude des caractéristiques rhéologiques des mélanges cimentaires à l'état frais.

L'incorporation d'une addition minérale fine ou ultrafine dans la formulation d'un mélange cimentaire engendre généralement deux phénomènes antagonistes dont l'équilibre détermine les caractéristiques du mélange frais. D'une part, les particules de l'addition minérale peuvent remplir les microporosités du squelette solide du mélange améliorant la compacité et l'ouvrabilité. D'autre part, en raison de leur finesse elles peuvent engendrer un besoin en eau supplémentaire ou une perte conséquente de l'ouvrabilité.

Afin d'évaluer l'apport de chacun de ces deux phénomènes, l'étude des mélanges frais doit avoir lieu en conservant constant le volume absolu des phases solides dans le mélange ; l'addition minérale est alors introduite en substitution volumique du ciment. Dans ces conditions, en fixant les caractéristiques rhéologiques des mélanges on peut déterminer les variations du besoin en eau et de la compacité en fonction de la quantité d'addition minérale incorporée, et inversement, en fixant la quantité d'eau on peut déterminer les modifications engendrées sur les caractéristiques rhéologiques et sur le besoin en adjuvants fluidifiants.

- Etude des caractéristiques mécaniques des matériaux cimentaires durcis

La substitution du ciment par les additions minérales volume par volume en préservant un volume absolu des composants solides constant, engendre une variation des résistances mécaniques des matériaux cimentaires avec additions durcis. Pour chaque mélange ayant acquis la consistance de référence, en ajustant la quantité d'eau ou la quantité d'adjuvant fluidifiant, nous déterminerons les résistances mécaniques des matériaux cimentaires durcis à 07 jours et 28 jours et nous évaluerons l'apport des additions minérales et des adjuvants superplastifiants sur ses résistances mécaniques.

- Etude des effets des additions sur les matériaux cimentaires

Les mécanismes à l'origine des modifications des propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires paraissent particulièrement complexes, mais plusieurs études dans ce domaine s'accordent pour distinguer trois principaux effets qui se superposent pour influencer les propriétés du matériau à l'état frais et durci : un effet granulaire qui résulte des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau ou d'adjuvant, un effet physico-chimique et microstructural engendré par les différentes interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et un effet chimique dû à l'activité chimique en milieu cimentaire de certaines phases minérales caractérisées par des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques.

Il paraît donc intéressant de pouvoir déterminer, en premier lieu, l'action physique des additions minérales sur les mélanges cimentaires afin d'appréhender les conditions dans lesquelles leur incorporation dans le mortier peut apporter des améliorations significatives de la compacité du squelette granulaire. Quant aux effets physico-chimiques, microstructural et chimique des additions, ils seront déterminées indirectement à partir de la modification de la résistance en compression des mortiers ou bétons en cours de durcissement ou par l'évaluation des facteurs d'activité chimique des additions qui seront déterminés à partir des modèles prédictifs de Bolomey ou de Féret, en se basant sur la notion du liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1.

En utilisant la méthodologie précédente sur une série d'additions minérales différentes par leurs caractéristiques minéralogiques, granulaires, morphologiques et texturales on devrait pouvoir quantifier l'influence de ces caractéristiques sur les propriétés des matériaux cimentaires et appréhender ainsi les règles générales pour l'optimisation de la structure granulaire des mortiers ou bétons avec additions. Parallèlement, l'évaluation de l'activité chimique des additions minérales doit fournir les éléments pour une prise en compte quantitative dans les modèles reliant les paramètres de formulation aux résistances mécaniques des mélanges durcis (Powers, Ferret, Bolomey, ...). L'accent sera mis sur l'analyse des mécanismes physico-chimiques et microstructuraux qui sont à l'origine des propriétés macroscopiques des mélanges cimentaires avec additions minérales et adjuvants fluidifiants et sur les phénomènes de dispersion et de floculation des particules fines et ultrafines dans les mélanges en présence ou non d'adjuvants fluidifiants.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. ADDITIONS MINERALES

I.1. DEFINITION DES ADDITIONS

Une addition minérale est définie par la norme européenne EN 206-1 comme étant :
Un Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

La norme européenne EN 206-1 considère deux types d'additions :

Le type I : additions quasiment inertes ;

Le type II : additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.

L'aptitude générale à l'emploi comme additions du type I est établie pour:

- Les fillers conformes à la prénorme prEN 12620 :2000 ;
- Les pigments conformes à la norme EN 12878.

L'aptitude générale à l'emploi comme additions du type II est établie pour :

- Les cendres volantes conformes à la norme EN 450 ;
- Les fumées de silice conformes à la prénorme prEN 13263 :1998.

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons utilisés en France est établie pour les additions normalisées suivantes :

- Les cendres volantes pour béton conformes à la norme NF EN 450-1 ;
- Les fumées de silice conformes à la norme NF P 18-502 ;
- Les laitiers vitrifiés moulus de hauts fourneaux de classe B conformes à la norme NF P 18-506 ;
- Les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508 ;
- Les additions siliceuses de catégorie A, conformes à la norme NF P 18-509.

I.2. ADDITIONS CALCAIRES [NF P 18-508]

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles.

Les additions calcaires conformes à la norme NF P18-508 sont du type I selon la norme EN 206-1 et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

I.3. ADDITIONS SILICEUSES [NF P 18-509]

Les additions siliceuses sont des produits finement divisés, constitués à plus de 96 % (valeur spécifiée inférieure) et à plus de 93.5 % (valeur limite absolue inférieure), par de la silice exprimé en SiO_2 mesurée sur produit sec et obtenus par broyage et/ou sélection de quartzes ou de cristobalites synthétiques.

Les additions siliceuses conformes à la norme NF P18-509 sont du type I selon la norme EN 206-1 et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

I.4. FUMÉE DE SILICE [NF P 18-502]

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage.

La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de la norme EN 206-1 et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.

Toute fois, compte tenu de la très grande finesse de ces addition et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

I.5. CENDRES VOLANTES POUR BETON [NF EN 450-1]

Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO_2 et de Al_2O_3 ; la proportion de SiO_2 réactive constituant au moins 25 % de la masse. Les cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1 sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1, et sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

I.6. LAITIER VITRIFIÉ MOULU DE HAUT FOURNEAU [NF P 18-506]

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié granulé ou bouleté, coproduit de la fabrication de la fonte et obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion.

Sont exclues de la norme : les laitiers de fonte non trempés cristallisés et donc non vitrifié utilisés comme ballast ou comme granulats et également les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des élément nuisibles aux béton tels que les sels métalliques.

La norme distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant plus élevée. Les laitiers conformes à la norme NF P 18-506 sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1, mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

II. ACTION DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire.

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes [1-12], s'accordent pour distinguer trois principaux effets des addition dans un matériau cimentaire.

- Un effet granulaire résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.
- Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.
- un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire (essentiellement présent dans le cas des additions du type II selon la norme EN 206-1), qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

II.1. EFFET GRANULAIRE

L'effet granulaire appelé aussi effet filler, concerne toutes les modifications induites par la présence des additions minérales dans le squelette granulaire d'un matériau cimentaire à l'état frais. Ces modifications peuvent résulter de la capacité d'empilement des particules fines ou ultrafines de l'addition avec les autres grains solides du mélange et/ou de l'intensité des frictions entre les différentes particules du mélange. Cet effet granulaire peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale, la distribution granulaire et le potentiel zéta des particules d'addition utilisées ; qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires [13, 14]. Il agit dès le malaxage sur toutes les étapes de mise en œuvre et influe sur la densité du squelette granulaire ainsi que sur la stabilité des mélanges frais.

Lorsque les particules de l'addition modifient peu les frictions inter granulaires et parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulats) en libérant l'eau contenue dans ces pores, l'effet granulaire devient favorable et conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci.

Plusieurs études ont montré en effet l'existence d'une optimisation des propriétés du squelette granulaire par l'incorporation d'additions minérales de natures et de quantités différentes.

Lewandowski [15] a montré que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes (figure I.1).

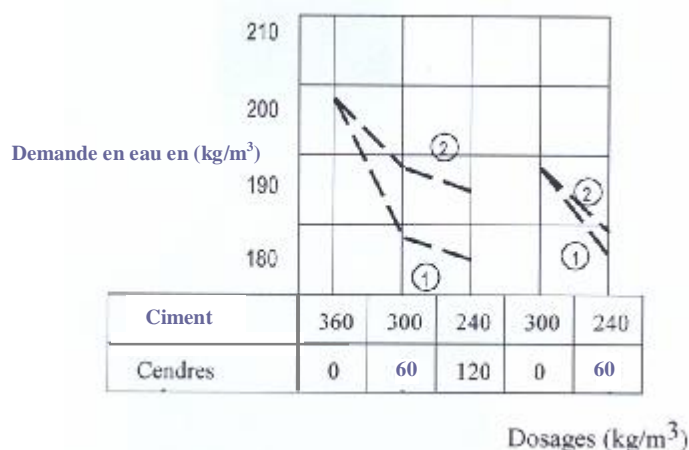


Figure I.1 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes dans une formulation de béton selon Lewandowski [15]

Dans le même contexte, Lange & al [16], ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau et augmentait la fluidité du mélange. Ce comportement a été expliqué par la forme sphérique des particules qui facilitent l'empilement granulaire et réduisent les frictions inter-particulaires [17]. La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau dans le mélange, plus réduite [13].

La finesse des particules d'addition peut être aussi un facteur qui influence la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais. En effet, Collins et Sanjayan [18], ont rapporté que dans les bétons, la fluidité du mélange était améliorée en remplaçant une partie du ciment par des additions ultrafines. Bajou & al [19], ont montré aussi que l'incorporation

d'une addition ultrafine de cendres volantes de surface spécifique 740 m²/kg, améliorait la fluidité et réduisait le besoin en eau du mélange à consistance normale.

De même, Kronlof [20] a montré en étudiant l'effet des agrégats ultrafins sur la résistance du béton, que l'incorporation dans une formulation de béton de trois additions de quartz de finesses différentes conduit à la diminution du besoin en eau en relation avec le dosage et la finesse du matériau de substitution (figure I.2).

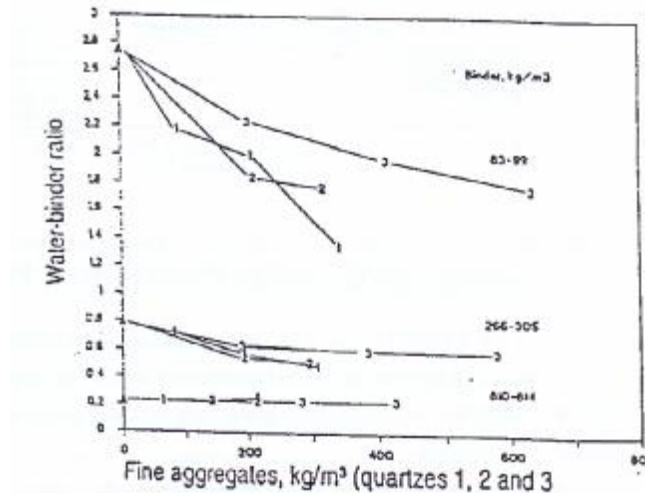


Figure I.2 : Variation du rapport eau/liant des bétons à même ouvrabilité en fonction de la teneur en additions quartzieuses selon Kronlof [20]

Dans le même sens, Kwan [21] a montré en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant (figure I.3).

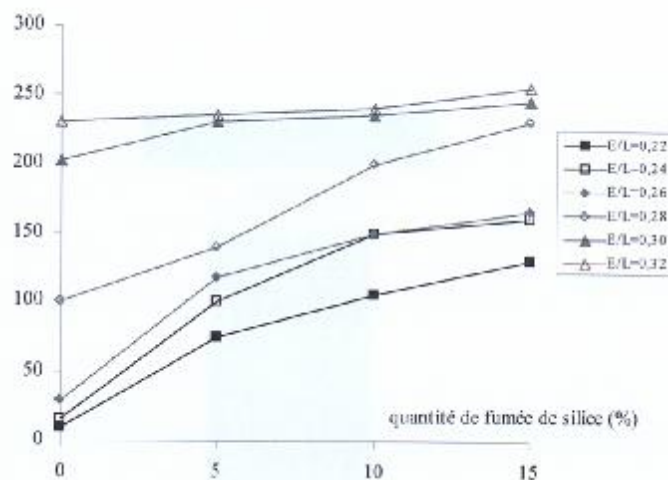


Figure I.3 : Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant selon Kwan [21]

De même, De Larard & al [22] ont montré en étudiant l'amélioration des mortiers et bétons due réellement à la fumée de silice, que la maniabilité d'un mortier varie selon la quantité de fumée de silice incorporée (figure I.4).

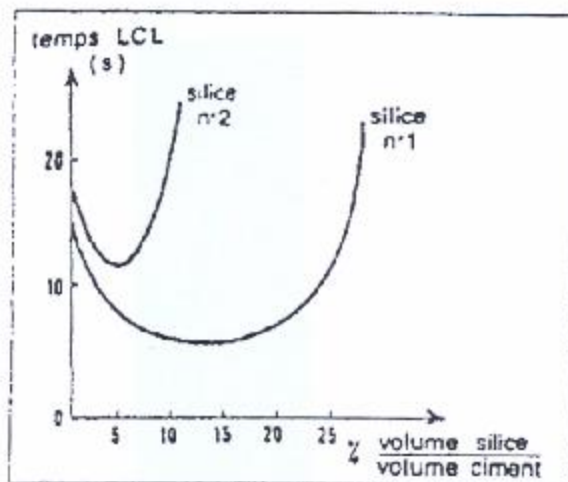


Figure I.4 : Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon De Larard & al [22]

D'autre part, Yijin & al [23], ont trouvé que l'incorporation de cendres volantes dans les pâtes de ciment, mortiers et bétons peut améliorer la fluidité du mélange, mais certaines additions plus grossières, ne pouvaient pas engendrer une réduction du besoin en eau.

Zhang et Han [24], ont montré aussi en étudiant l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, que la contrainte d'écoulement (yield stress) augmentait avec la quantité d'addition ultrafine incorporée, mais la viscosité de la pâte variait avec la nature et la quantité d'addition. Lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice, cendres volantes ou calcaires est inférieur à 15 %, la viscosité de la pâte est réduite remarquablement. Ceci n'a pas été remarqué pour les additions de laitier.

En effet, lorsque les particules de l'addition modifient considérablement les frictions inter granulaires dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les porosités du squelette granulaire, l'effet granulaire devient dans ce cas, défavorable.

Gallias & al [25] ont montré en étudiant l'effet des additions minérales fines sur le besoin en eau des pâtes de ciment, que l'introduction d'additions à forte proportion dans les pâtes de ciment à consistance normalisée engendre un besoin en eau plus élevé (figure I.5).

Bessa [7] a pu montrer en étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers non adjuvants dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite (figure I.6).

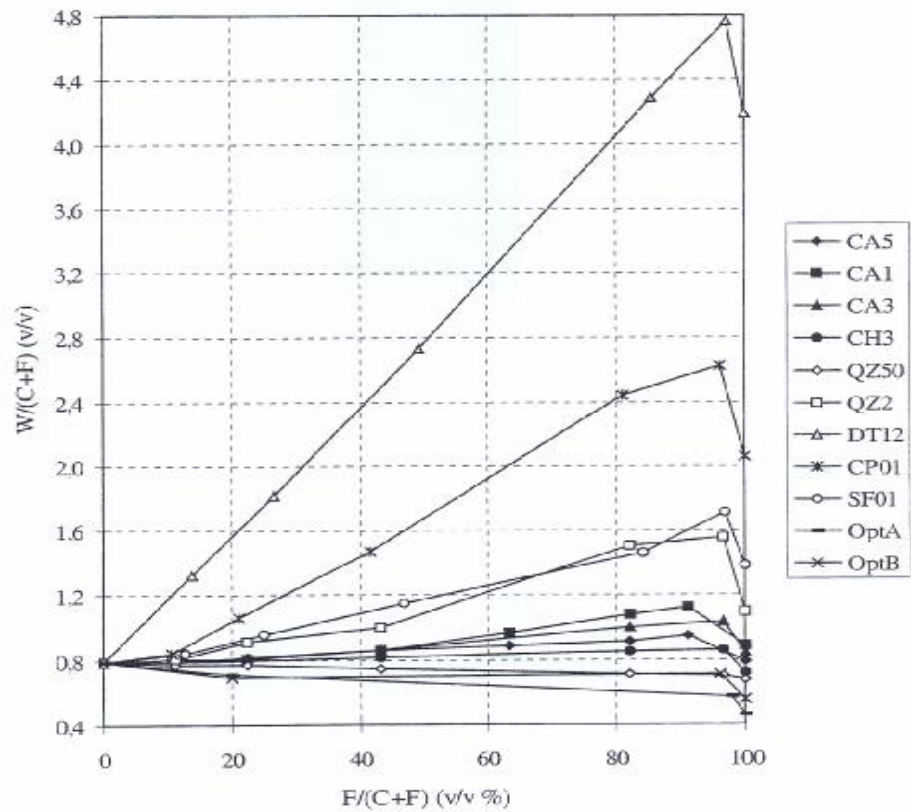


Figure I.5 : Besoin en eau des pâtes de ciments CEM II en fonction de la proportion d'additions minérales, selon Gallias & al [25]

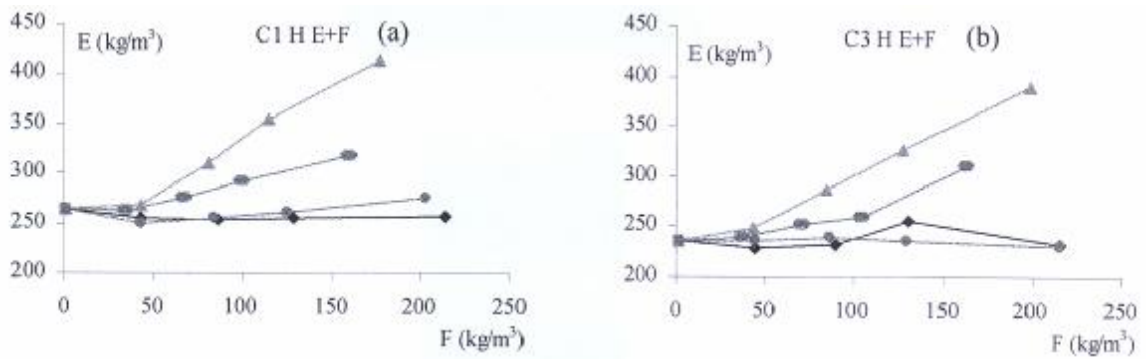


Figure I.6 : Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvantes en fonction du dosage en additions minérales, selon Bessa [7]

L'analyse des différents résultats passés en revue permet de conclure que l'effet granulaire des additions minérales, peut être favorable ou défavorable sur le comportement des matériaux cimentaires à l'état frais. Cet effet dépend de plusieurs facteurs qui caractérisent les additions minérales (nature, quantité, finesse et morphologie), et qui influencent la rhéologie des matériaux cimentaires. Cet effet influe sur le serrage des particules dans le squelette granulaire et par voie de conséquence, sur le processus

d'hydratation du ciment et le développement des effets physico-chimiques, microstructuraux et chimiques.

D'autre part, l'analyse des travaux publiés, ne permet pas encore de disposer d'une approche suffisamment construite et approfondie qui permette de prévoir l'effet que peut produire une addition donnée dans une formulation et de ce fait, nous ne maîtrisons pas encore les critères de choix des additions pour améliorer les propriétés rhéologiques ou la compacité d'une formulation donnée.

II.2. EFFET PHYSICO-CHIMIQUE ET MICROSTRUCTURAL

L'effet physico-chimique et microstructural concerne toutes les modifications engendrées par les multiples interactions entre les particules de l'addition minérale sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés.

De nombreux auteurs sont unanimes sur le fait que l'introduction des additions minérales dans un mélange cimentaire modifie le processus d'hydratation du ciment indépendamment de la nature de l'addition [2-7, 8, 9, 12, 26-34].

Lilkov [26] a mesuré la quantité d'hydrates formés au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire et a montré que cette quantité est plus importante dans des mélanges cimentaires avec additions de fumée de silice et cendres volantes que dans les mélanges sans additions (figure I.7).

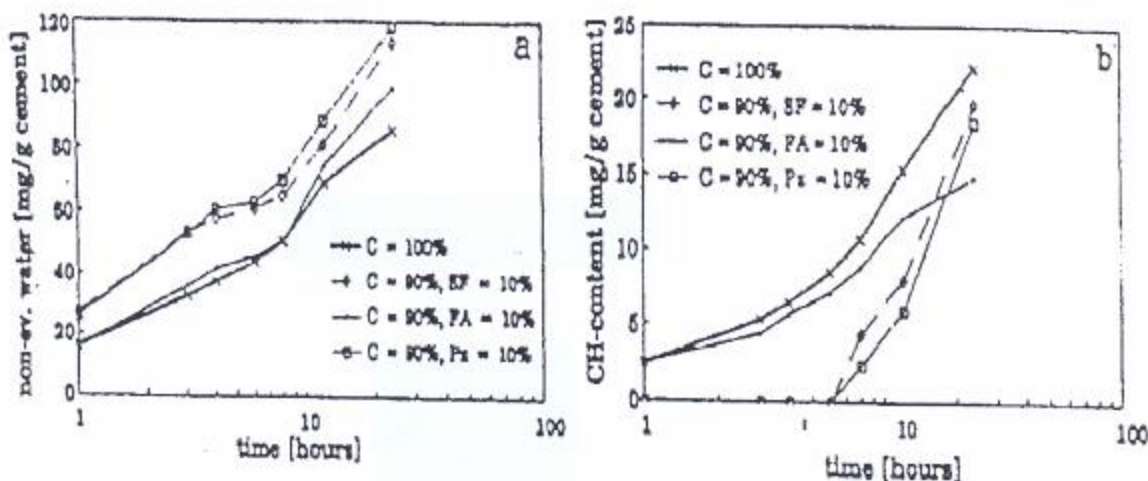


Figure I.7 : Formation d'hydrates au cours des premières 24 heures en fonction du pourcentage d'additions employées selon Lilkov [26]

a- en quantité d'eau évaporée b- en quantité de portlandite

De même Hanna [27] a montré en étudiant la contribution à l'étude de la structuration des mortiers de ciment Portland contenant des particules ultrafines, que la quantité de chaleur dégagée au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire est modifiée par l'incorporation de différents pourcentages de fumée de silice (fig. I.8). Ces résultats sont

confirmés par Jiang et Van Damme [28] en étudiant l'action des additions siliceuses et calcaires sur le processus d'hydratation du C₃S pur.

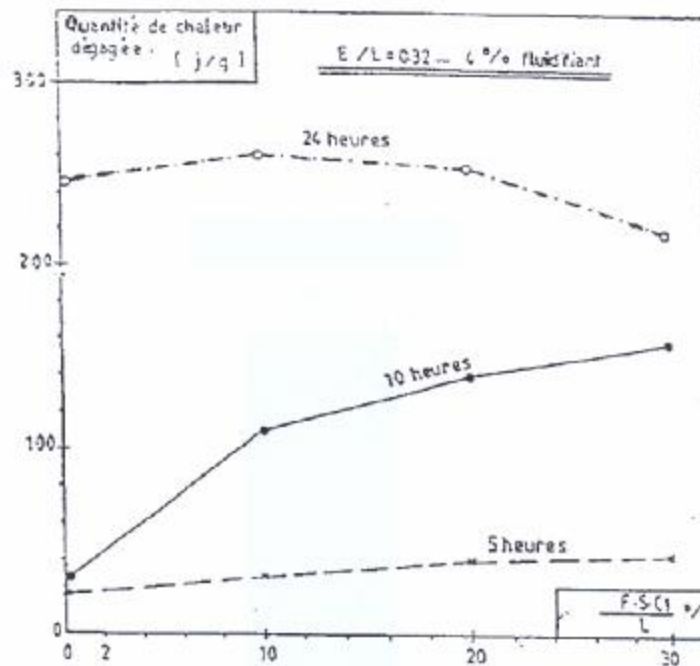


Figure I.8 : Variation de la quantité de chaleur dégagée en fonction de la teneur en fumée de silice selon Hanna [27]

D'autre part, Lawrence & al [4] ont également montré en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que le degré d'hydratation à courts termes des mortiers contenant des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de référence sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes (figure I.9).

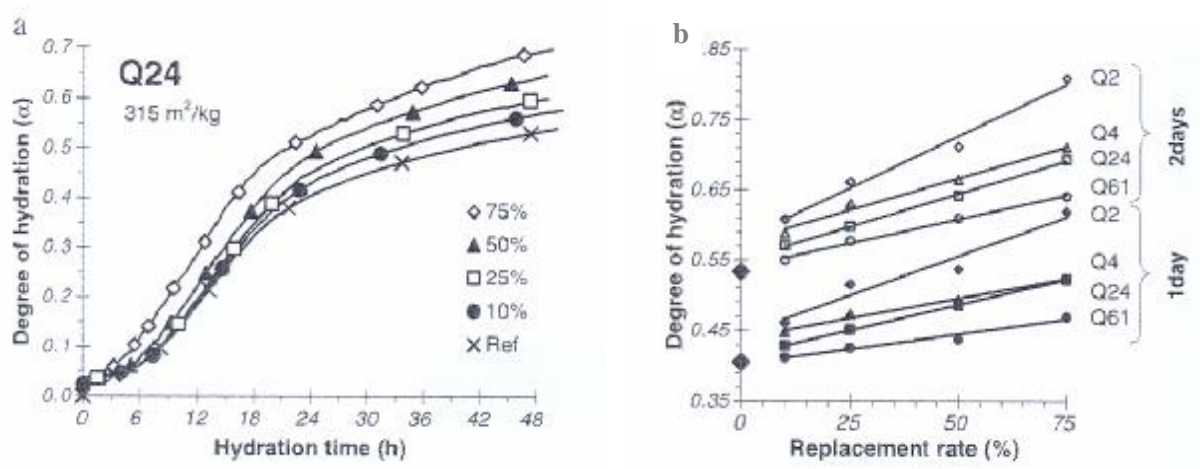


Figure I.9 : Degré d'hydratation des mortiers contenant des additions de quartz selon Lawrence & al [4]

a- pendant les premières 48 heures pour différents taux de substitution du ciment par l'addition dans le cas du quartz Q24.

b- à 1 jour et 2 jours pour différents taux de substitution du ciment par l'addition dans le cas de quartz de finesses différentes.

Ils ont également identifié les deux effets physiques principaux responsables de l'hydratation du ciment et ont montré que la nucléation hétérogène qui croît avec la finesse de l'addition, présente un optimum en fonction du taux de substitution du ciment.

Dans le même contexte Cyr & al [8], ont montré en quantifiant les effets physiques des additions minérales sur l'hydratation à courts termes dans les mortiers, que pour une addition donnée, le surplus d'hydratation du ciment dépendait de la quantité d'addition incorporée (figure I.10). Ils ont aussi montré que les particules d'additions influencent la cinétique d'hydratation uniquement lorsqu'ils sont proches des grains de ciment et que ce n'était possible que lorsque la quantité de quartz dans le mélange reste peu importante.

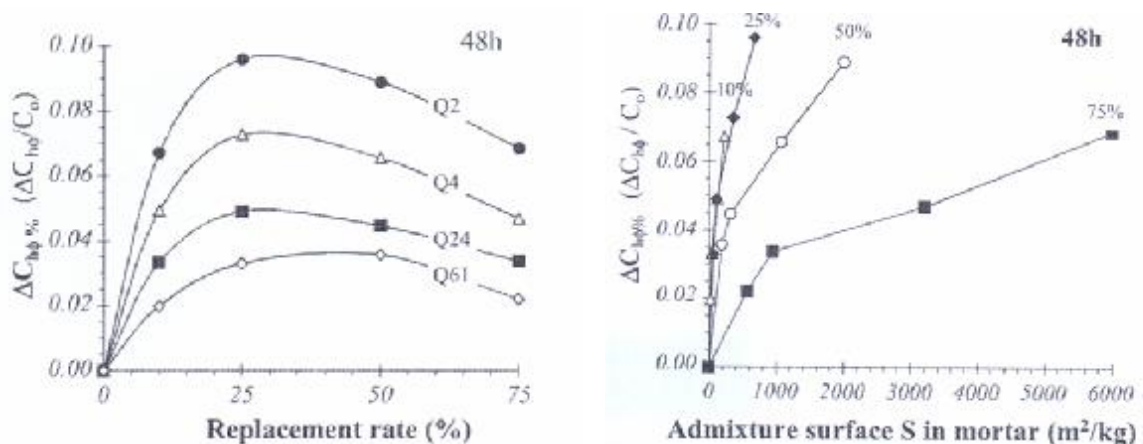


Figure I.10 : Surplus d'hydratation du ciment dans des mortiers avec additions de quartz en fonction de la quantité et de la finesse des particules, selon Cyr & al [8]

Dans le domaine microstructurale et microchimique, Ramlochan & al [29], ont montré en étudiant les effets de la pouzzolane et du laitier sur l'expansion des mortiers (figure I. 11), que :

- L'incorporation de la pouzzolane et du laitier dans un mélange cimentaire, modifiait le produit interne de la phase alite, mais ce produit ne diffère pas significativement par rapport au cas du ciment seul,
- Les sulfates et les aluminates étaient proportionnés différemment parmi les pores liquides et les phases solides,
- La microstructure du matériau cimentaire était modifiée,
- La formation de l'ettringite n'était pas expansive.

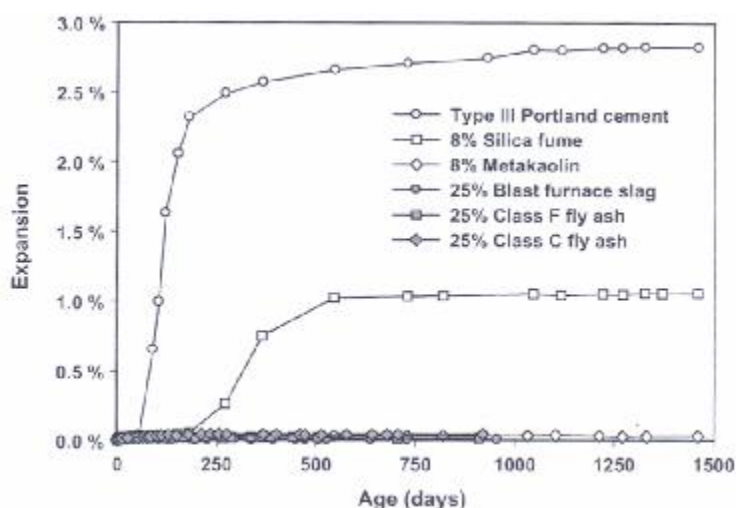


Figure I.11 : Expansion d'un mortier standard contenant des pouzzolanes ou du laitier, conservé à 95°C, selon Ramlochan & al [29]

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'action des additions sur le processus d'hydratation du ciment. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment et facilite ainsi la formation d'une structure solide garantissant les premières résistances mécaniques [30, 31]. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire entraîne une augmentation du rapport effectif eau/ciment et conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [3].

A nos jours, il n'est donc plus à démontrer que les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions de ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire [6, 9, 32, 33, 34]. Pour les additions calcaires, il semble que la présence du carbonate de calcium (CaCO_3) favoriserait l'hydratation du C_3S dès les premiers instants d'autant plus que les particules sont fines et la quantité de CaCO_3 est importante (jusqu'à 15 à 20 % en masse) [28, 35]. Pour les additions siliceuses, les particules de quartz peuvent constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [36].

Ainsi, la présence des additions minérales provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment et favorise les propriétés du matériau durci aux jeunes âges, d'autant plus que les particules sont fines [35], cependant cet effet favorable semble s'estomper avec le temps.

En effet, Husson [37] a montré en étudiant l'analyse physico-chimique et mécanique des interactions ciment – fillers dans les mortiers, qu'à long terme, les additions minérales

utilisées dans certaines proportions pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges (figure I.12).

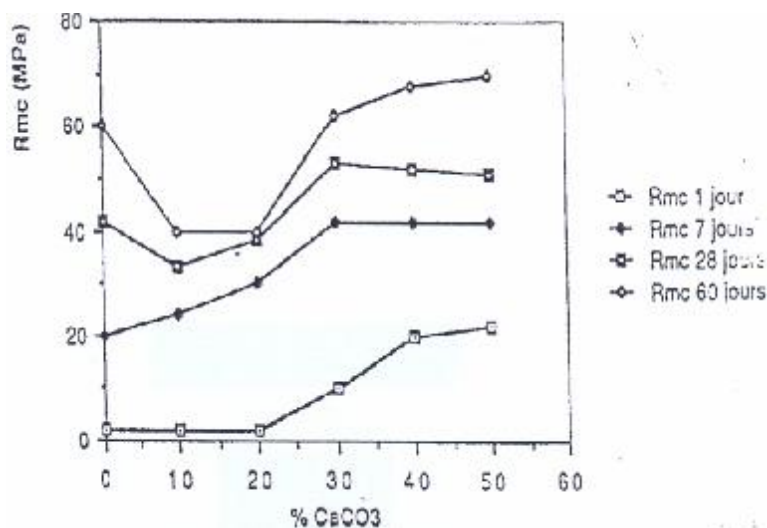


Figure I.12 : Variation des résistances en compression des pâtes cimentaires en fonction de la teneur en CaCO_3 à différentes échéances selon Husson [37]

D'une manière générale, on peut conclure que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

II.3. EFFET CHIMIQUE

Alors que l'effet physico-chimique et microstructural concerne d'une façon générale toutes les additions minérales indépendamment de leur nature minéralogique, l'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment. La norme européenne désigne les additions chimiquement actives comme étant du type II, en prenant en compte leur activité hydraulique latente ou leur activité pouzzolanique.

Appa Rao [38] a montré en étudiant le développement des résistances avec l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice, que pour un rapport eau/liant constant égal à 0,5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 30 % de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier (figure I.13).

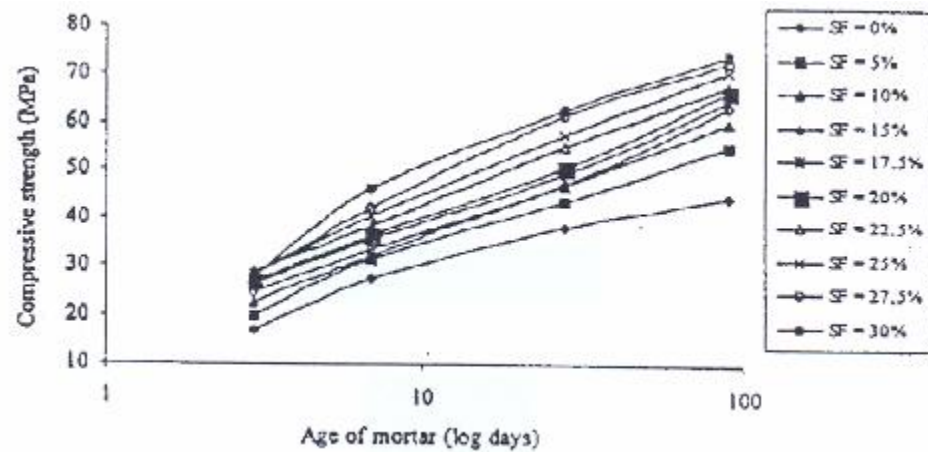


Figure I.13 : Variation des résistances en compression des mortiers en fonction du temps d'hydratation pour différentes teneurs en fumée de silice pour un rapport eau/liant de 0.5, selon Appa Rao [38]

Kwan [21] a également montré en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, que quelque soit le rapport eau/liant, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 15 % de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression à 28 jours (figure I.14).

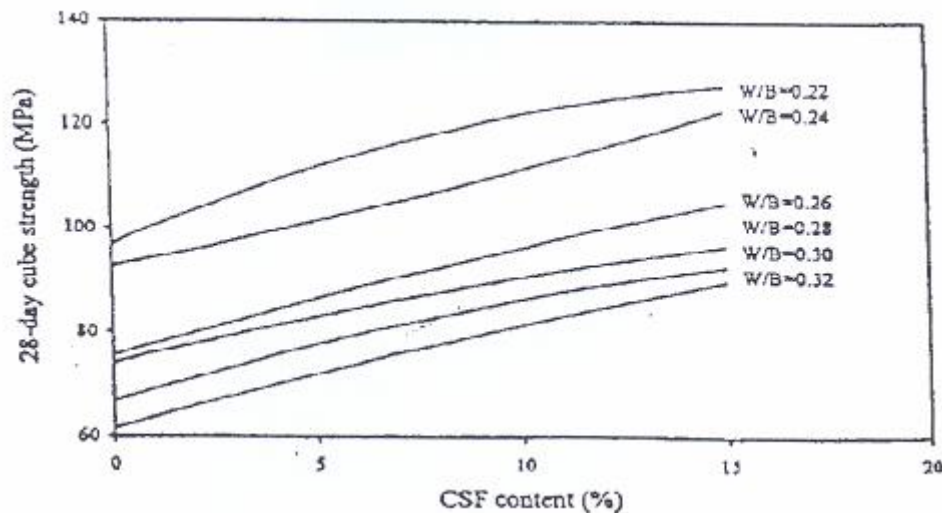


Figure I.14 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon Kwan [21]

Demirboga [39] a montré en étudiant l'influence des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers, que la densité des mortiers avec additions diminuait avec l'augmentation des additions de fumée de silice, cendres volantes et laitier à l'exception de 10 % de laitier. D'autre part, il avait noté que l'incorporation de 10 % de fumée de silice,

engendrait une amélioration de la résistance en compression à 7, 28 et 120 jours, alors que les cendres volantes engendraient une diminution de la résistance en compression à tout âge et pour toutes les quantités. Le laitier granulé de hauts fourneaux engendrait une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours.

Benzet et Benhassine [36] ont également montré en étudiant l'influence de la taille des particules de quartz dans la réaction pouzzolanique, que le quartz cristallisé finement broyé, peut sous certaines conditions réagir avec la portlandite. Toute fois, la quantification d'une faible activité chimique séparément de l'effet physico-chimique et microstructural est difficile et incertaine.

D'autre part, Lawrence & al [9] ont également montré en étudiant l'effet de la nature, la quantité et la finesse des additions minérales fines (quartz, calcaire, et cendres volantes), sur les résistances en compression des mortiers, que pour des finesses proches du ciment, et à 07 jours, les mortiers contenant des additions calcaires présentaient des résistances en compression supérieures à celles des mortiers avec additions de quartz. Cette différence devenait négligeable à 28 jours pour un taux de substitution du ciment donné (figure I.15).

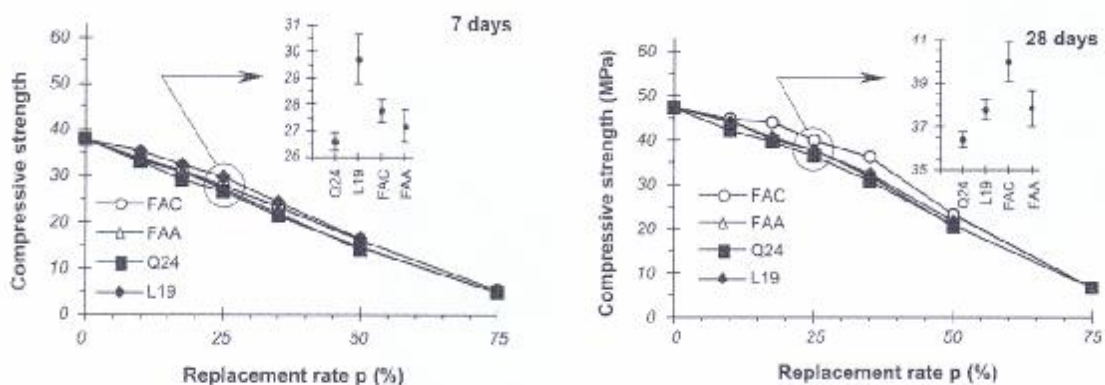


Figure I.15 : Evolution de la résistance en compression pour les mortiers avec additions de finesse équivalente, en fonction du taux de substitution du ciment, selon Lawrence & al [9]

Les auteurs avaient montré que les mortiers avec additions calcaires et de quartz présentaient des densités et des volumes d'air occlus équivalents, ce qui suggère que le comportement particulier des additions calcaires n'est pas dû à la réduction de la porosité. Ils ont donc avancé qu'il était plus logique de penser qu'il existe des mécanismes particuliers qui améliorent les résistances en compression des mortiers avec additions calcaires à partir de 2 jours, mais qui devenaient négligeable à 28 jours. Ce comportement a été justifié par la formation des aluminates et des carbo-aluminates [40]. Les auteurs ont aussi retenu que l'amélioration des résistances en compression est sûrement dû aux phénomènes de nucléation hétérogène observé par plusieurs auteurs [28, 10]. Cette nucléation hétérogène qui est un processus physique, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment

et dépend de la finesse des particules d'additions, de la quantité d'addition dans le mélange et de l'affinité de la poudre d'addition (nature) avec les hydrates de ciment.

Une approche plus explicite a été avancée par Cyr & al [5], pour quantifier les effets physiques et chimiques des additions fines sur les résistances en compression. Dans cette approche la résistance en compression (f_p) d'un mortier contenant une quantité ($p\%$), d'addition minérale est représentée comme la combinaison de trois effets qui se superposent (figure I.16). Cette méthode rejoint l'approche utilisée par Lawrence dans l'étude de l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires [3].

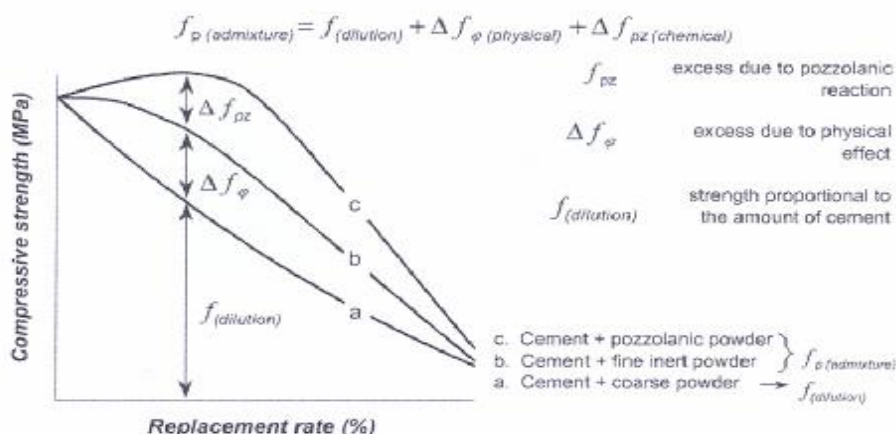


Figure I.16 : Décomposition de la résistance en compression en fractions dues aux effets physiques et chimiques de l'addition minérale, selon Cyr & al [5]

$f_{(dilution)}$, désigne la résistance proportionnelle à la quantité de ciment sans les effets physiques et chimiques des additions minérales.

Δf_{φ} (Physical), désigne l'amélioration de la résistance qui est due à l'effet physique de l'addition minérale, en raison de l'effet filler et de la nucléation hétérogène.

Δf_{pz} (Chemical) désigne l'amélioration de la résistance qui est due à l'effet chimique de l'addition minérale qui est dû à la réaction pouzzolanique.

L'effet de dilution (figure I.17), a été expliqué comme étant la conséquence à la substitution du ciment par l'addition. Une quantité plus faible de ciment hydraté va engendrer des résistances en compression plus faibles.

L'effet physique (figure I.18), est dû à l'effet filler et à la nucléation hétérogène.

- Les auteurs ont montré que l'effet filler était négligeable pour les additions considérées comme inertes tels que le quartz et le calcaire, et de ce fait cet effet ne pouvait pas être la cause de l'augmentation des résistances en compression.

- Les auteurs ont conclu que la nucléation hétérogène augmentait avec la finesse de l'addition et ont confirmé que la quantité optimale d'addition était de 25 % et 35 %, car au-delà de cette quantité l'effet s'escompte en raison de l'éloignement d'une partie des additions pour participer à la nucléation du processus d'hydratation du ciment.

L'effet chimique (figure I.19), est dû à l'activité pouzzolanique de certaines additions qui améliore la résistance en compression du ciment. Les auteurs ont montré que l'effet chimique des cendres volantes commence à être significatif à partir de 07 jours et croît avec l'âge. La quantité optimale d'addition qui conduisait à une activité pouzzolanique maximale était de 35 % et 40 %.

Pour les additions calcaires, Cyr & al [5], ont noté que l'addition calcaire n'est pas totalement inerte puisqu'elle réagit avec le C_3A et le C_4AF pour former des carbo-aluminates. Ils ont pu montrer que les résistances en compression des mortiers avec additions calcaires étaient supérieures à celles des mortiers avec additions de quartz, mais cet effet a été négligé en comparaison aux effets physiques.

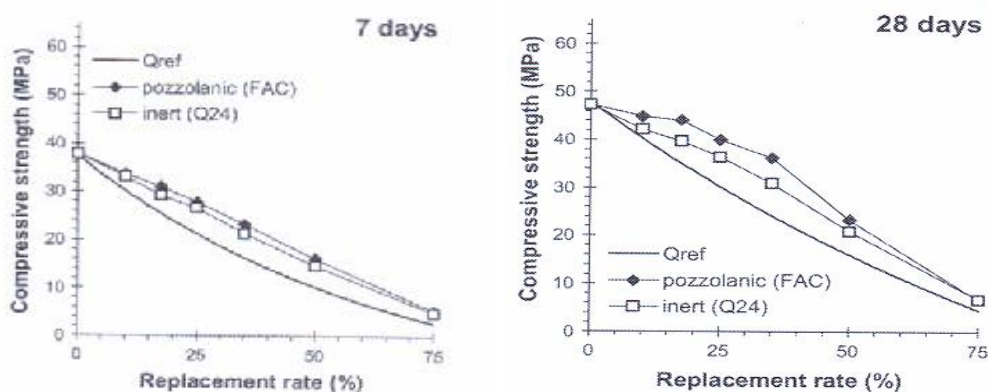


Figure I.17 : Résistance en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers contenant des additions de quartz et des cendres volantes de même finesse par rapport à une addition de référence avec effet de dilution seul, selon Cyr & al [5]

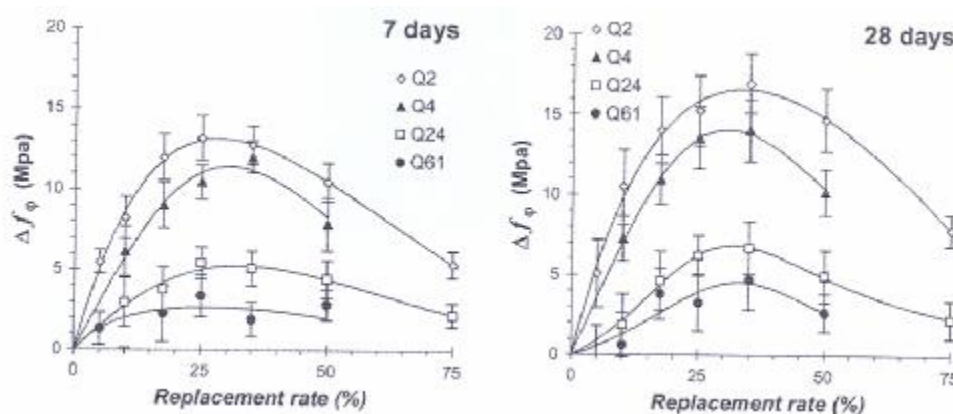


Figure I.18 : Amélioration de la résistance en compression Δf_ϕ à 07 et 28 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz, selon Cyr & al [5]

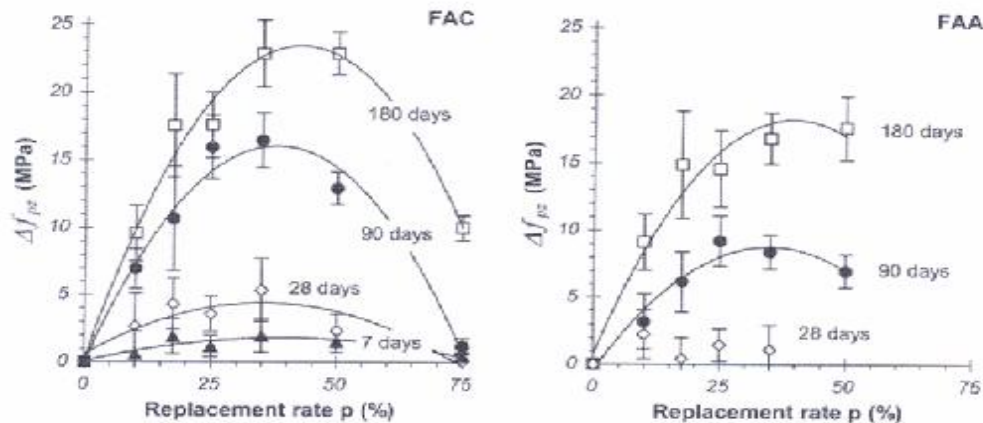
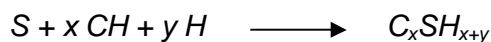


Figure I.19 : Amélioration de la résistance en compression Δf_{pz} à 07 et 28 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz, selon Cyr & al [5]

D'une manière générale, la réaction pouzzolanique concerne principalement :

Les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (classe F), les pouzzolanes naturelles et les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit en présence de l'eau avec la portlandite $Ca(OH)_2$, formée durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés $C-S-H$ suivant la réaction suivante :



L'activité hydraulique concerne plus particulièrement les laitiers de hauts fourneaux et les cendres volantes calcaïques (classe C), qui en raison du caractère basique du milieu cimentaire, peuvent produire des $C-S-H$ dont le rapport C/S est différent de celui issu des réactions pouzzolaniques.

Par ailleurs, les additions calcaïres présentent aussi une réactivité en présence des produits hydratés du ciment [1]. Dans ce cas, la calcite ($CaCO_3$) réagit avec les aluminates du ciment (C_3A , C_4H_{13}) en présence de l'eau pour former un mono-carbo-aluminate de calcium hydraté du type $C_3A.CaCO_3.11H_2O$, cristallisant en fines plaquettes hexagonales. Toute fois, l'activité chimique des additions calcaïres est significativement plus faible que celle des additions siliceuses à caractère pouzzolanique.

Il en résulte que l'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Son action sur les propriétés du matériau durci peut être quantifiée par la mesure du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie rend difficile toute distinction claire entre ces deux effets et fait qu'ils peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment [7].

III. UTILISATION DES ADDITIONS MINÉRALES DANS LA FORMULATION DES BETONS

III.1. METHODES DE FORMULATION DES BETONS SANS ADDITIONS

Les méthodes de formulation des bétons sont utilisées pour déterminer les quantités relatives des différents constituants du mélange dans une configuration simple permettant d'obtenir les propriétés rhéologiques souhaitées du mélange à l'état frais ainsi que les résistances mécaniques requises pour le matériau à l'état durci. Ces méthodes sont basées sur des relations empiriques qui relient les paramètres de formulation et les propriétés requises du béton. Les méthodes de formulation des bétons les plus utilisées en France sont celles de Dreux [41] ou de Faury [42] qui s'appuient sur quatre relations principales [6].

- Une relation entre la résistance en compression du béton et le rapport eau/ciment dans la matrice cimentaire en fonction de la classe des ciments et la nature des agrégats. Cette relation s'appuie sur des modèles prédictifs de la résistance en compression comme ceux de Bolomey ou de Féret.
- Une relation entre le rapport eau/ciment et le dosage en ciment, d'une part et sa consistance, d'autre part.
- Une relation entre la consistance du béton frais et la compacité ou la masse volumique apparente du mélange frais après la mise en place en fonction des moyens de serrage et la dimension maximale des granulats.
- Une relation qui permet de définir le rapport entre les classes granulaires grossières et les classes granulaires fines conduisant à l'optimisation du squelette granulaire du mélange et à l'obtention de la compacité maximale.

La première relation permet de relier les résistances requises pour le béton à un paramètre clef de la formulation du béton qui est le rapport eau/ciment. A partir de ce rapport et d'un dosage minimal en ciment fixé pour l'ouvrage ou de la consistance désirée, on détermine avec la deuxième relation soit le dosage en eau et la consistance, soit le dosage en ciment et en eau. A partir du dosage en ciment, la troisième relation permet de déterminer le volume total des granulats et la quatrième relation permet de déterminer le volume relatif des différentes classes granulaires à mettre en œuvre dans le mélange.

Sur la base des relations précédentes, il paraît donc tout à fait possible de définir la composition de chaque constituant d'un béton courant en partant des valeurs requises pour la résistance en compression et la consistance ou le dosage en ciment. De ce fait, ces méthodes sont tout à fait adaptées pour comparer des formulations en fonction de la variation des caractéristiques d'un composant du mélange comme la classe du ciment ou la granulométrie des granulats.

Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important. Néanmoins, la formulation des mélanges avec

additions minérales pose encore de nombreuses questions malgré que de multitudes études sur les méthodologies de formulation des bétons avec additions minérales aient vues le jour pour optimiser la quantité d'addition ou définir les critères qui permettent d'obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques spécifiques pour les bétons.

III.2. POINT DE VUE DE LA NORMALISATION SUR LA PRISE EN COMPTE DES ADDITIONS DANS LA FORMULATION DES BETONS

La norme européenne EN 206-1 définit les conditions de prise en compte des additions minérales en substitution partielle du ciment dans la formulation des bétons en considérant le concept de liant équivalent et définit un coefficient forfaitaire, k de prise en compte des additions minérales qui est déterminé pour les cendres volantes et les fumées de silice utilisées avec un ciment de type CEM I.

Le concept du coefficient k et de liant équivalent autorise la prise en compte des additions de type II et de certaines additions de type I :

- En remplaçant le rapport eau/ciment par le rapport eau/(ciment + $k \times$ addition).
- En remplaçant l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence appliquée au liant équivalent.

Le liant équivalent est constitué de ciment de type CEM I 42.5 N ou CEM I 42.5 R ou CEM I 52.5 N ou CEM I 52.5 R et d'une des additions normalisées substituables au ciment au sens et sous les conditions de la norme EN 206-1.

Ce coefficient définit la proportion de l'addition qui participe avec le ciment dans la notion du liant équivalent L_{eq} , comme suit :

$$L_{eq} = C + k.F \quad (I.1)$$

C , désigne la quantité de ciment dans le béton (kg/m^3),

F , désigne la quantité d'addition dans le béton (kg/m^3),

k , désigne un coefficient de prise en compte des additions minérales dans le liant.

Selon la norme EN 450-1, la quantité maximale de cendres volantes à prendre en compte pour le concept de coefficient k doit respecter la condition suivante :

$$(Cendres\ volantes / ciment) \leq 0.33 \text{ (en masse)}$$

Les valeurs de k pour un béton à base de ciment CEM I sont :

$$CEM\ I\ 32.5: k = 0.2 \quad CEM\ I\ 42.5: k = 0.4$$

Selon la prénorme prEN 13263 :1998, la quantité maximale de fumées de silice à prendre en compte pour le concept de coefficient k doit respecter la condition suivante :

$$(Fumées\ de\ silice / ciment) \leq 0.11 \text{ (en masse)}$$

Les valeurs de k pour un béton à base de ciment CEM I sont :

$$Pour\ E/C \leq 0.45 \quad k = 2.0$$

$$Pour\ E/C > 0.45 \quad k = 2.0 \text{ sauf pour les classes d'exposition XC et XF, } k = 1.0$$

Pour des bétons utilisés en France, l'aptitude générale à l'emploi des additions est établie pour les valeurs suivantes du coefficient k données dans le tableau I.1 :

Tableau I.1 : Valeur du coefficient k pour les bétons utilisés en France

<i>Addition</i>	<i>Valeur du coefficient k</i>	<i>Conditions supplémentaires</i>
Additions de type II		
Cendres volantes pour béton	0.6	Si $i_{28} \geq 0.83$ et $i_{90} \geq 0.95$
	0.5	Si $i_{28} \geq 0.80$ et $i_{90} \geq 0.90$
	0.4	Si $i_{28} \geq 0.75$ et $i_{90} \geq 0.85$
Fumée de silice	2.0	$E/C \leq 0.45$ et $C \geq 295 \text{ kg/m}^3$ (XA)
	2.0	$E/C \leq 0.45$ et $C \geq 280 \text{ kg/m}^3$ (autres que XA)
Laitiers vitrifiés moulus de Hauts fourneau de classe B	1.0	Dans les autres cas
	0.90	$h_{3/7} \geq 0.70$ et $h_{3/7} \geq 0.85$
Additions de type I		
Additions calcaires	0.25	$i_{28} \geq 0.71$
Additions siliceuses	0.25	$i_{28} \geq 0.71$
Toutes additions		
Pour quantités d'additions dépassant les valeurs limites des normes et pour les autres ciments et additions	0.00	

Il en résulte donc que la norme européenne EN 206-1 limite l'application de la notion du liant équivalent aux additions du type II et à d'autres types d'additions dans la mesure où l'aptitude à l'emploi est établie sans proposer aucune méthode permettant d'établir cette aptitude à l'emploi. La France étend son application aux additions calcaires et siliceuses qui sont considérées par la norme européenne comme étant des additions quasi inertes (type I). Dans ce cas, une addition calcaire ou siliceuse quasi inerte classée comme addition du type I selon la norme européenne EN 206-1, lui correspond selon la norme française P 18-305, un coefficient k égal à 0.25 lorsqu'elle est substituée à un ciment CEM I de classe 42.5 et supérieure. D'autre part, la valeur de k pour une addition de cendres volantes substituables à un ciment CEM I 42.5, prend une valeur de 0.4 selon la norme européenne EN 206-1, alors qu'elle peut atteindre une valeur de 0.6 selon la norme française P 18-305.

D'autre part, l'homogénéisation des conditions expérimentales pose toujours des problèmes dus à la modification des propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires en présence d'additions. En effet, la consistance des mélanges cimentaires en présence d'additions diffère souvent de celle des mélanges de référence sans additions, ce qui

modifie très significativement les conditions de mise en place et de serrage et peut entraîner des variations importantes des propriétés mécaniques et de durabilité des matériaux confectionnés. Or, les méthodologies expérimentales les plus récentes ne tiennent pas compte de l'effet granulaire engendré par l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires, alors qu'il peut influencer significativement les indices d'activité. En effet, en l'absence d'une correction de la consistance du mortier avec addition à celle du mortier de référence, comme c'est le cas de la méthodologie normative actuelle, l'effet granulaire d'une addition s'il est fortement défavorable va se traduire par une modification des propriétés rhéologiques agissant directement sur la capacité de serrage du mélange à l'état frais et par la suite sur la compacité du matériau durci et sur ses caractéristiques mécaniques indépendamment de l'activité physico-chimique ou chimique de l'addition minérale.

On peut donc avancer que les normes européennes ne proposent pas encore de cadre méthodologique rigoureux et unique pour définir le coefficient d'activité k d'un liant comprenant un ciment plus une addition minérale normalisée.

III.3. POINT DE VUE DES ETUDES RECENTES SUR LA PRISE EN COMPTE DES ADDITIONS DANS LA FORMULATION DES BETONS

Les principales études réalisées dans le domaine de la formulation des bétons sont basées sur l'adaptation des modèles prédictifs de résistance en compression existants et ont considéré spécialement les fumées de silice fortement active qui sont utilisées dans les mélanges cimentaires pour obtenir des bétons à hautes performances.

Ainsi, sur la base du modèle prédictif de Féret [1], la résistance en compression à 28 jours est définie comme suit :

$$R_{c28} = G_F f_{c28} \left(\frac{c}{c + e + v} \right)^2 \quad (1.2)$$

c , désigne le volume de ciment dans le béton en l/m^3 ;

e , désigne le volume d'eau dans le béton en l/m^3 ;

v , désigne le volume d'air occlus dans le béton en l/m^3 ;

G_F , désigne un coefficient qui dépend de la nature des granulats ;

f_{c28} , désigne la résistance en compression du mortier normal à 28 jours.

De Larard [43] a proposé le modèle suivant :

$$R_{c28} = \frac{G_F f_{c28}}{\left[1 + 3.1 \frac{e/c}{1.4 - 0.4 \exp(-11 fs/c)} \right]^2} \quad (1.3)$$

fs , désigne le volume de fumée de silice dans le béton en l/m^3 ;

De même, sur la base du modèle prédictif de Bolomey [1], la résistance en compression à 28 jours est définie comme suit :

$$R_{c28} = G_B f_c \left(\frac{C}{E+V} - 0.5 \right) \quad (1.4)$$

C , désigne la masse de ciment dans le béton en kg/m^3 ;

E , désigne la masse de l'eau de gâchage dans le béton en kg/m^3 ;

V , désigne la masse de l'eau équivalente au volume d'air occlus dans le béton en kg/m^3 ;

G_B désigne un coefficient qui dépend de la nature des granulats ;

f_{c28} désigne la résistance en compression du mortier normal à 28 jours.

Kadri [44] a proposé le modèle suivant :

$$R_{c28} = G \cdot f_{c28} \frac{C}{E+V} \left\{ 1.36 - [2.1(FS/C)^2 - 0.6]^2 \right\} \quad (1.5)$$

FS , désigne la masse de fumée de silice dans le béton en kg/m^3 ;

D'autres approches basées sur le même principe ont été également publiées mais restent limitées à certaines additions comme la fumée de silice, fortement active chimiquement et en présence d'adjuvants fluidifiants puissants.

Une approche plus générale a été avancée par Lawrence en étudiant l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires [3], dans laquelle il propose un schéma de principe pour l'évaluation de l'effet chimique et physico-chimique des cendres volantes et des additions calcaires et siliceuses sur la résistance en compression des mortiers. Dans cette approche, les additions sont introduites en substitution massique du ciment en conservant constant le rapport massique eau/(ciment+addition). Lawrence a montré que la considération d'un coefficient k qui désigne l'activité des additions de manière forfaitaire comme dans le cas de la normalisation française ou européenne ne pouvait pas être utilisé dans les modèles prédictif, car les résultats obtenus ont démontré que la valeur de ce coefficient est variable et dépendait de l'âge et des paramètres de formulation du béton ou du mortier tels que, la nature, le dosage et la finesse de l'addition, du type et du dosage en ciment et le dosage en eau et en granulats. Plusieurs études antérieures telles que celles de Cyr [2], Babu et Rao [45] et Goplan [46], avaient déjà confirmé ce point de vue.

Dans le même contexte, Cyr & al [12], en étudiant la variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales, ont confirmé la réactivité chimique des additions calcaires en comparant l'évolution des résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec deux cendres volantes et une addition calcaire (figure I.20).

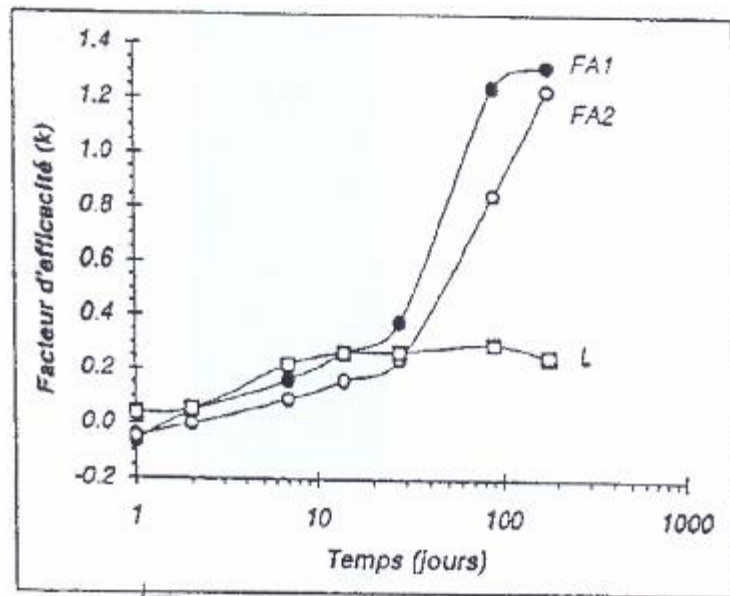


Figure I.20 : Variation du facteur d'efficacité k de deux cendres volantes (FA1 et FA2) et d'une addition calcaire (L) en fonction de l'âge du mortier, selon Cyr & al [12]

Une approche expérimentale différente a été proposée par Kara Ali [11] pour l'étude de l'effet des additions minérales sur les propriétés des mélanges cimentaires en considérant un nombre d'additions différentes par leurs natures minéralogiques, chimiques et morphologiques (figure I.21). Dans cette étude, l'auteur a travaillé sur des mélanges à caractéristiques rhéologiques constantes pour mettre en évidence l'effet granulaire des additions et l'introduction des additions minérales a été réalisée en substitution volumique du ciment afin de pouvoir comparer la densité de l'empilement granulaire des différents mélanges. Les résultats obtenus ont confirmé ceux de Lawerence quant à la variabilité des modifications induites par la présence des additions dans les matériaux cimentaires.

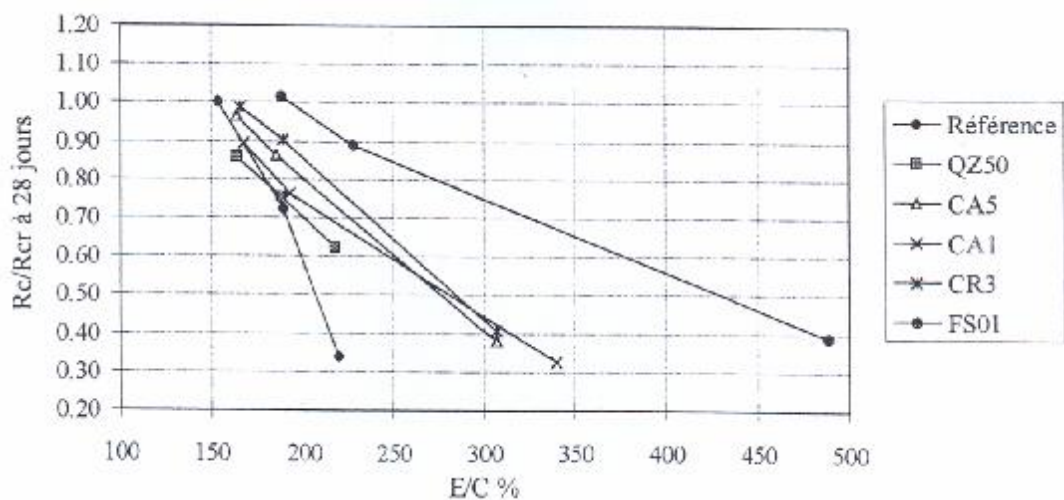


Figure I.21 : Variation de la résistance relative des mortiers avec différentes additions en fonction du rapport E/C selon Kara Ali [11]

Il en résulte donc que le principe de la valeur forfaitaire pour le coefficient k qui tient compte des effets physico-chimiques et chimiques des additions sur la résistance en compression des mortiers et bétons semble inadapté et de ce fait, la prise en compte des additions minérales dans les modèles prédictifs pour la résistance en compression doit prendre en compte plusieurs caractéristiques des additions telles que les caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques et granulaires, en plus de la nature du ciment et les principaux paramètres de formulation du béton.

D'autre part, il serait important de noter que dans la majorité des études publiées et conformément aux textes normatifs, l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires est effectuée en substitution massique du ciment.

Dans son étude, Bessa [7], a montré en étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, que le volume absolu du liant (ciment+addition) croît proportionnellement au taux de substitution du ciment par l'addition et si de plus le rapport eau/liant reste constant, le rapport volumique eau/liant diminue et par conséquent la porosité du mélange frais aussi. De ce fait, les modifications dans la matrice cimentaire sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment par l'addition est significatif, pouvant ainsi influencer directement les résistances mécaniques. Pour parer à ces modifications Kara Ali [6] et Bessa [7] ont accompli leurs travaux expérimentaux en introduisant les additions minérales en substitution volumique du ciment afin de maîtriser la densité de l'empilement granulaire des différents mélanges.

D'autre part, toutes les études ont montré que l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires, modifie leurs propriétés à l'état frais, indépendamment du mode d'introduction des additions minérales. En effet Shannag et Yeginobali [47], Zhang et Malhorta [48], Bai & al [49], Collins et Sanjayan [44], Dhir & al [50], Gallias & al [25], Gallias et Kara Ali [51], ont étudié l'effet des additions minérales sur le besoin en eau des mélanges cimentaires à caractéristiques rhéologiques constantes et ont montré qu'elles engendrent soit une augmentation ou une réduction de la quantité d'eau dans les mélanges modifiant directement la compacité du squelette granulaire des mélanges.

Dans le cas où la quantité d'eau est maintenue constante dans le mélange, Kwan [21], a montré que la fluidité ou la consistance des mélanges était sensiblement modifiées et dans ce cas, ce sont les conditions de mise en œuvre et de serrage qui sont modifiées et indirectement la compacité des mélanges frais dans les moules.

On peut donc avancer que pour bien évaluer l'effet des additions minérales du point de vue quantitatif, il est indispensable de maîtriser l'effet granulaire engendré par ces additions et de ce fait, tenir compte de la capacité d'empilement des particules de l'addition avec les autres composants solides du squelette granulaire et de l'intensité des frictions de

ces particules en présence d'eau, qui sont influencés principalement par la finesse et la morphologie des particules de l'addition.

Dans le cas général, l'augmentation du besoin en eau ou la diminution de la fluidité engendrés par l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires est maîtrisé par l'utilisation des adjuvants fluidifiants qui permettent de réduire les frictions entre les composants solides du mélange et rompre la floculation des particules fines en limitant la quantité d'eau piégée dans les vides interstitiels et augmentent l'ouvrabilité du matériau cimentaire [44, 48, 49, 52, 53]. Cette utilisation des adjuvants fluidifiants est courante dans les bétons à hautes performances et les bétons autoplaçants, la maîtrise du besoin en eau et de la fluidité des formulations avec additions reste basée sur l'expérience et on ne dispose pas encore de relation entre l'effet granulaire des additions et le besoin en adjuvants.

En conclusion, pour l'évaluation quantitative précise des effets physico-chimiques et éventuellement chimiques des additions minérales dans la formulation des matériaux cimentaires, il serait nécessaire de maîtriser l'effet granulaire et maintenir la compacité du squelette granulaire lorsque les additions minérales sont introduites dans le mélange cimentaire.

En Algérie, les études qui ont considéré l'effet des additions minérales sur les matériaux cimentaires se sont intéressées essentiellement à certains matériaux naturels locaux ou co-produits industriels à faible coût dans notre pays.

Houhou et mezghiche [54] ont montré en étudiant l'influence de l'ajout pouzzolanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment, que la plus grande partie de l'évolution de la résistance mécanique et par conséquent de l'effet pouzzolanique qui y est associé se produisait à partir de l'âge de 7 jours (figure I.22).

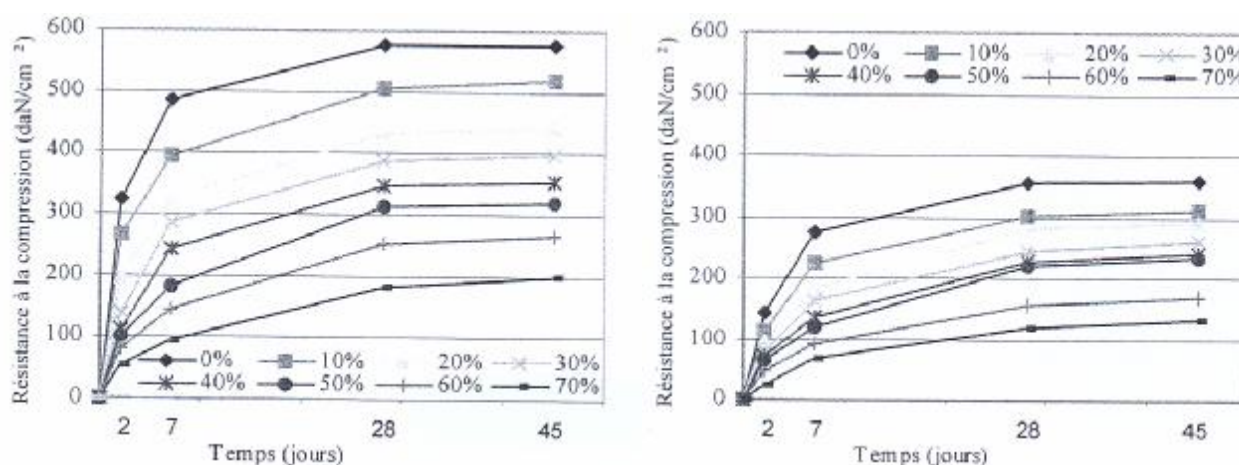


Figure I.22 : Effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance en compression des ciments durcis à l'état naturel selon Houhou et Mezghiche [54]

a- $E/(C+P)=0.3$

b- $E/(C+P)=0.5$

Belhachemi [55] a montré en étudiant l'influence de la surface spécifique Blaine sur les résistances d'un ciment pouzzolanique (figure I.23), que :

- L'augmentation de la finesse engendre une augmentation de l'eau de gâchage nécessaire pour une consistance normale.
- L'augmentation de la finesse accélère le début et la fin de prise qui est caractérisée par une augmentation relative de la viscosité accompagnée d'une élévation de la chaleur d'hydratation.
- L'augmentation de la finesse engendre une augmentation de la résistance en compression à 2, 7 et 28 jours, jusqu'à une valeur optimale de la finesse qui est de l'ordre de 4800 cm²/g, pour laquelle la résistance commence à diminuer en raison de la destruction de silicates bicalciques et tricalciques.

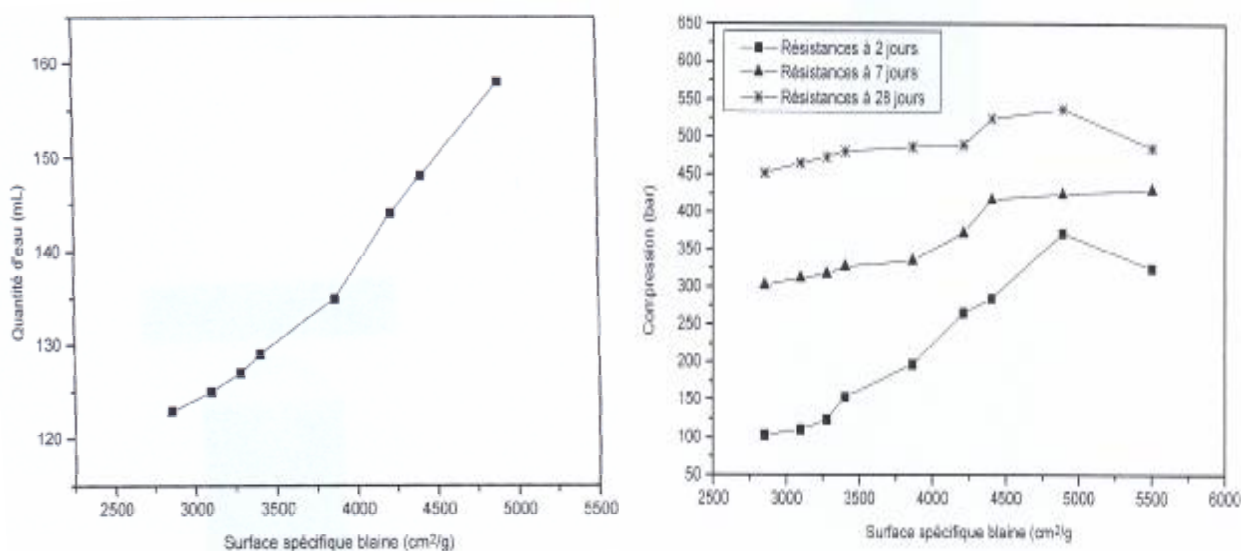


Figure I.23 : Quantité d'eau et résistances en compression en fonction de la surface spécifique Blaine selon Belhachemi [55]

Aichouba & al [56] ont montré en étudiant l'effet de la pouzzolane naturelle de Bénisaf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10 à 30 % engendre une augmentation de la consistance normale, une diminution du temps de prise, une diminution des résistances mécaniques à jeunes âges et une conservation de ces résistances à long terme (figure I.24).

Ezziane & al [57] ont montré en étudiant l'efficacité du laitier d'El Hadjar par le concept du liant équivalent, que l'utilisation d'un taux élevé du laitier d'El Hadjar (40%) lui confère un déclenchement d'activité très précoce (2j), seulement cette activité ne sera jamais achevée à long terme (90j). Dans ce cas, un taux de 15 % paraît optimal.

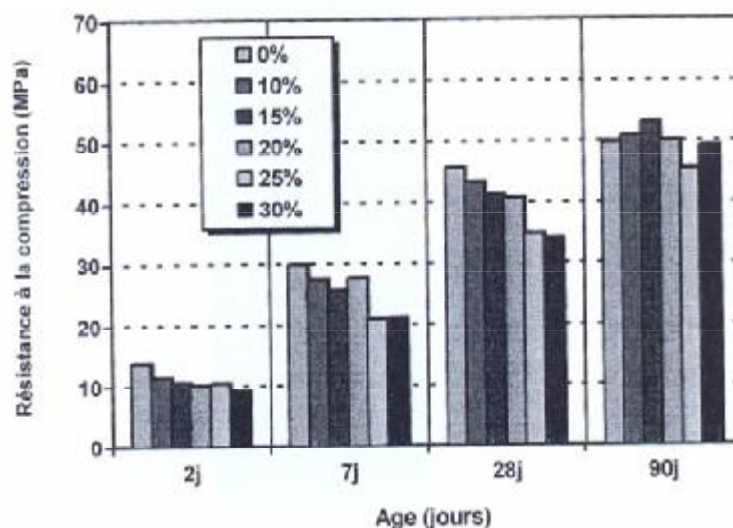


Figure I.24 : Développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge selon Aichouba & al [56]

IV. ADJUVANTS PLASTIFIANTS REDUCTEURS D'EAU

IV.1. DEFINITION [norme EN 934-2]

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à des doses inférieures ou égales à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci.

Un adjuvant plastifiant réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire la teneur en eau d'un béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement/l'étalement, ou qui produit les deux à la fois.

Ces adjuvants doivent être conformes aux exigences du tableau 1 et aux exigences complémentaires du tableau 2 [norme EN 934-2].

IV.2. DESCRIPTION

Les plastifiants réducteurs d'eau sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment et provoquent une défloculation des grains de ciment ainsi que les autres fines et ultrafines. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport eau/ciment conduisant à une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. A même dosage, leur effet dépend de la réactivité du ciment, des ions en solution dans l'eau interstitielle du béton, de la durée de malaxage et du moment plus ou moins tardif de leur introduction [1, 41].

Les plastifiants réducteurs d'eau peuvent être classés d'après leur nature ionique et on retrouve ainsi des réducteurs d'eau anioniques, cationiques ou non ioniques ; les

réducteurs d'eau anioniques sont plutôt les plus utilisés dans le béton. Ils peuvent être classés d'après leur nature chimique et on trouve les réducteurs d'eau à base de lignosulfonates, de sels d'acide carboxylique ou de carbohydrates.

Keijger [58] a représenté la formule chimique développée de quelques molécules qui entrent dans la composition de la plupart des réducteurs d'eau commerciaux (figure I.25).

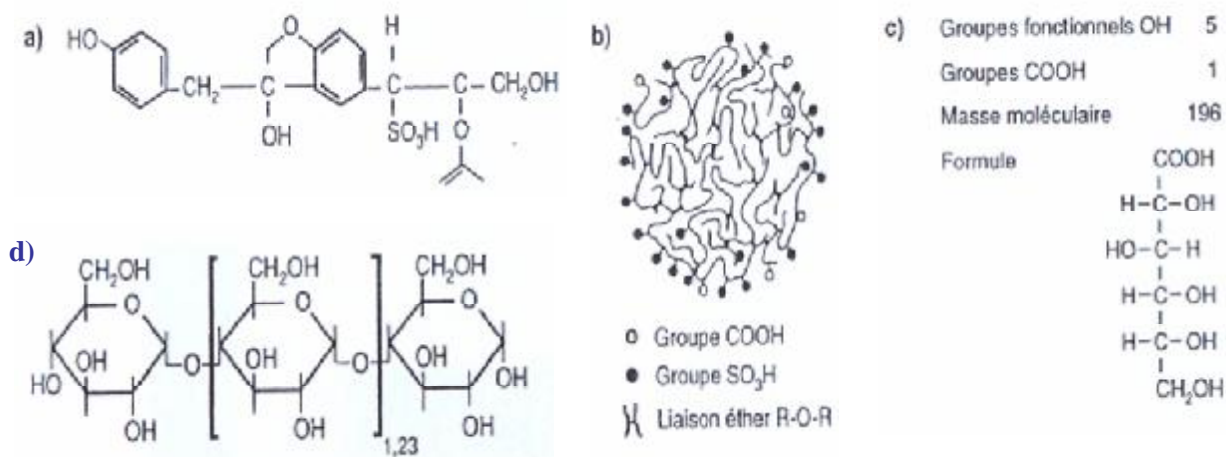


Figure I.25 : Formules chimiques développées des principales molécules organiques entrant dans la composition des réducteurs d'eau selon Keijger [58]

a- Motif de base d'un acide lignosulfonique, d'après Rixom et Mailvaganam [59]

b- Représentation schématique d'un micro gel de lignosulfonate, d'après Rixom et Mailvaganam [59]

c- Acide hydroxycarboxylique.

d- Polymères à base de polysaccharides naturels (carbohydrate).

Les plastifiants sont généralement utilisés à des doses comprises entre 0.3 et 0.5 % du poids de ciment et se caractérisent souvent par un effet secondaire de retardateur de prise à dosage plus élevé [41].

IV.3. MECANISMES D'ACTION

Les grains de ciment en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas ayant une structure en château de carte, c'est la floculation. Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains qui tend à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des flocs et empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment qui se trouvent en quelques sortes soudés les uns aux autres (figure I.26).

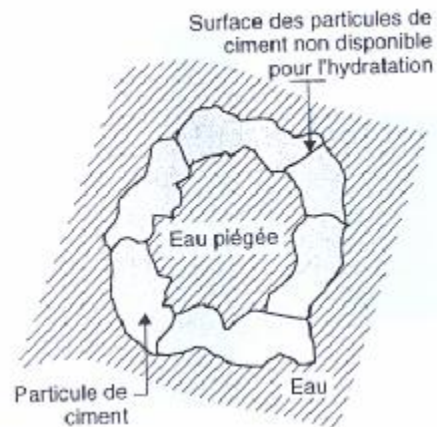


Figure I.26 : Floc de ciment en l'absence de réducteur d'eau selon Rixom et Mailvaganam,[59]

Les principaux constituants actifs de ces adjuvants sont des agents tensioactifs qui sont des substances se concentrant à l'interface de deux phases non miscibles et modifiant les forces physico-chimiques qui agissent sur cette interface. Ces substances sont adsorbées sur les grains fins de ciment ou d'additions en suspension dans l'eau leur conférant une charge négative qui conduit à une répulsion entre les grains qui sont ainsi défloculés et leur suspension se trouve stabilisée (figure I.27).

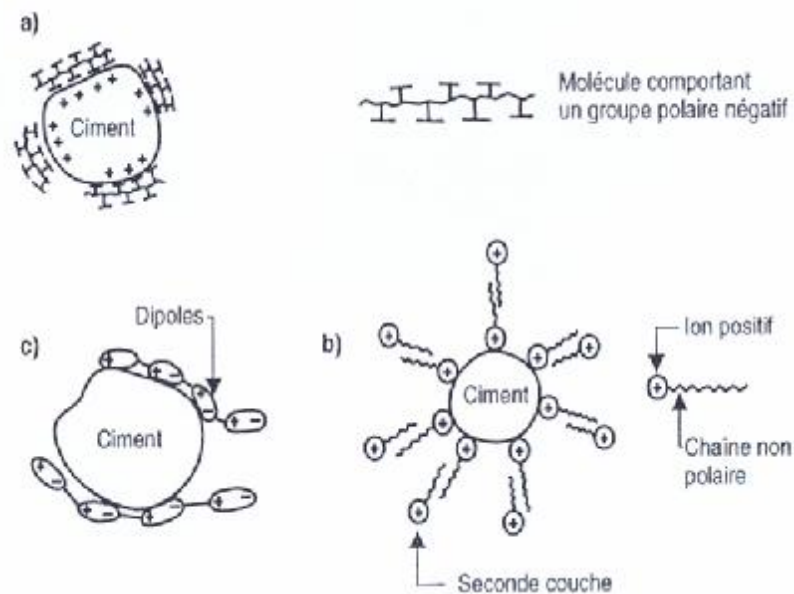


Figure I.27 : Mode d'action des molécules des réducteur d'eau suivant leur nature ionique selon keijger, [58]

a- Mode d'action d'un réducteur d'eau anionique.

b- Mode d'action d'un réducteur d'eau cationique comportant une chaîne non polaire.

c- Mode d'action des réducteurs d'eau non ioniques.

Dans ce cas, les adjuvants réducteurs d'eau augmentent la surface des grains de ciment qui engendrent l'hydratation initiale, ainsi que la quantité d'eau disponible pour l'hydratation. De plus, les charges électrostatiques sont à l'origine du développement autour de chaque grain, d'une gaine formée de molécules d'eau orientées qui empêchent le rapprochement des grains les uns vers les autres et qui ont alors une plus grande mobilité et l'eau libérée du système floculé devient disponible pour lubrifier le béton et fait croître sa maniabilité [34].

IV.4. INFLUENCE DU DOSAGE EN PLASTIFIANT

La réduction d'eau augmente en général avec le dosage en plastifiant (figure I.28a), mais dépend aussi de la teneur en C_3A du ciment (figure I.28b), de la teneur en alcalins du ciment (figure I.28c), du dosage en ciment (figure I.28d), ainsi que de la surface spécifique du ciment et de la nature du sulfate de calcium utilisé lors du gypilage du ciment.

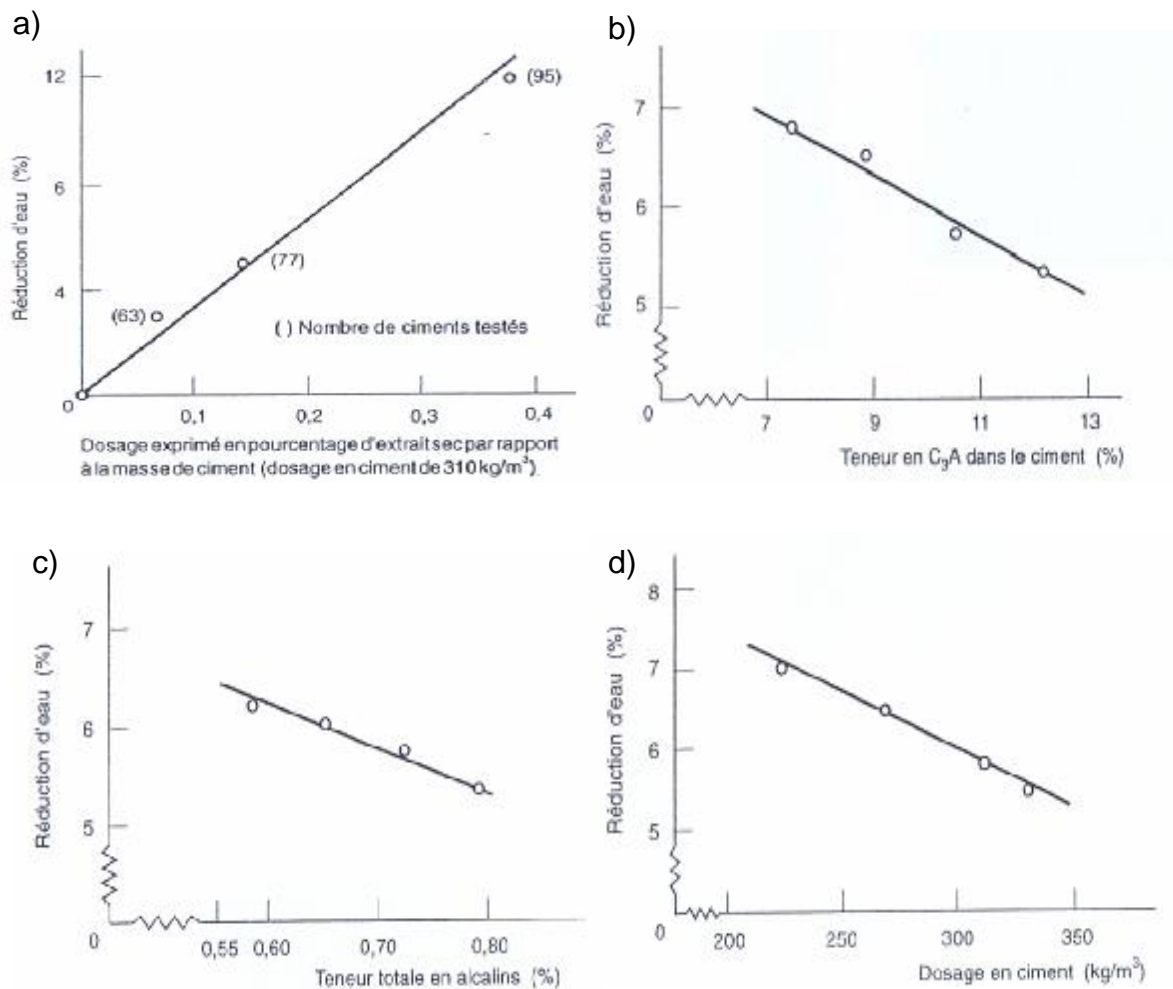


Figure I.28 : Influences du dosage en réducteur d'eau (a), de la teneur en C_3A (b), de la teneur totale en alcalins (c) et du dosage en ciment (d), sur le pourcentage de réduction d'eau selon Dodson [60]

Le pourcentage de réduction d'eau augmente linéairement avec le pourcentage d'extrait sec des bétons à même quantité de ciment. Ceci montre la prépondérance de l'effet de surface dans le mode d'action du réducteur d'eau utilisé.

Le pourcentage de réduction d'eau diminue linéairement avec la teneur en C_3A dans le ciment, et donc, plus le ciment contient du C_3A et moins le réducteur d'eau est efficace. Ceci est expliqué par le fait qu'un certain nombre de molécules du réducteur d'eau se combinent avec le C_3A pour former des composés organo-minéraux et ne contribuent plus à la dispersion des grains de ciment.

La teneur en alcalins tend à réduire l'efficacité des réducteurs d'eau, mais cet effet n'est pas très important.

Le pourcentage de réduction d'eau diminue avec l'augmentation du dosage en ciment. Ceci peut être expliqué par le fait que le sulfate de calcium se dissout de plus en plus difficilement dans une eau de gâchage de plus en plus chargée en ions de toutes sortes.

Comme le principal effet des adjuvants réducteur d'eau est la dispersion des grains de ciment entraînant l'augmentation de la surface disponible des grains pour l'hydratation ; cette dernière progresse à une plus grande vitesse les premiers instants, d'où une augmentation de la résistance du béton adjuvanté. Une répartition plus uniforme du ciment pourrait elle aussi contribuer à l'augmentation de la résistance, car le processus d'hydratation est amélioré [61]. Ceci est particulièrement perceptible dans les bétons à jeunes âges, mais peut se prolonger sous certaines conditions [62].

Bien que les adjuvants réducteurs d'eau influencent la vitesse d'hydratation du ciment, la nature des produits hydratés reste inchangée, de même que la structure de la pâte de ciment hydratée [63].

D'autre part, Emoto et Bier [64], ont montré en étudiant l'influence des plastifiants sur le comportement rhéologique et l'hydratation cinétique, que la fluidité des matériaux cimentaires était fortement influencée par le type de plastifiants qui retardent l'hydratation du ciment (figure I.29).

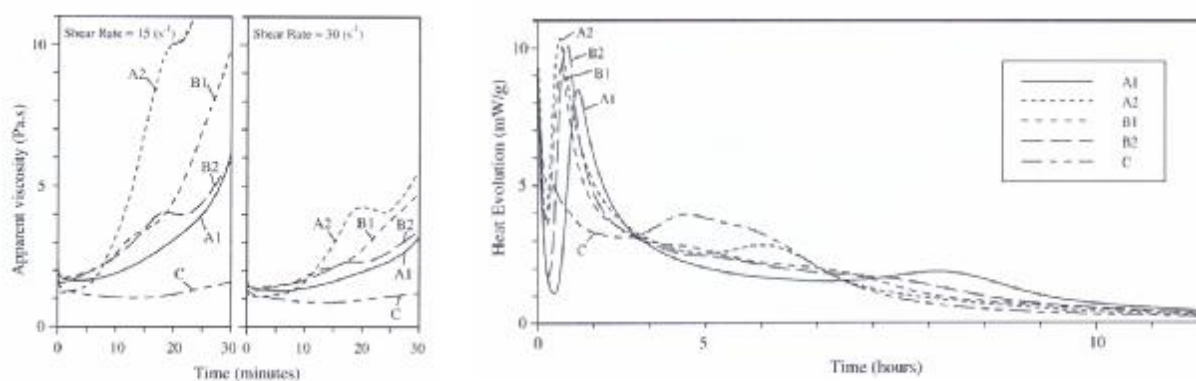


Figure I.29 : Influence du plastifiant sur la viscosité apparente et l'hydratation de l'ettringite, selon Emoto et Bier [64]

V. ADJUVANTS SUPERPLASTIFIANTS HAUTS REDUCTEURS D'EAU

V.1. DEFINITION [Norme EN 934-2]

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement/l'étalement, ou qui produit les deux à la fois.

Ces adjuvants doivent être conformes aux exigences du tableau 1 et aux exigences complémentaires des tableaux 3-1 et 3-2 [Norme EN 934-2].

V.2. DESCRIPTION

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau est la désignation en français des « Superplasticisers – high range water reducers », et qui se rapporte à des produits qu'on appelait auparavant en France " fluidifiants" [41]. Ce sont des réducteurs d'eau beaucoup plus efficace et très différents de ceux qui ont été traités dans le paragraphe (IV).

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont des polymères de synthèse, fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de poly-naphtalène sulfoné, de sel de sodium de poly-mélamine sulfoné, de copolymère acrylate-ester (polycrylate), ou de lignosulfonate de grande pureté [1] ; les plus utilisés sont les deux premiers qui sont communément appelés superplastifiants à base de naphtalène (figure I.30) et superplastifiants à base de mélamine (figure I.31), respectivement.

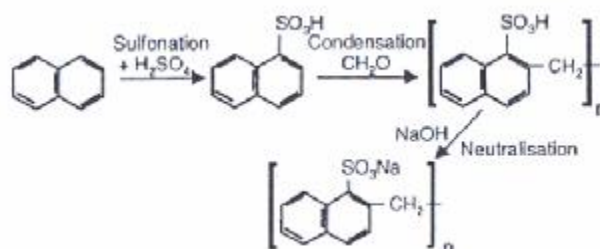


Figure I.30 : Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de sels de sodium de poly-naphtalène sulfoné selon Rixom et Mailvaganam [59]

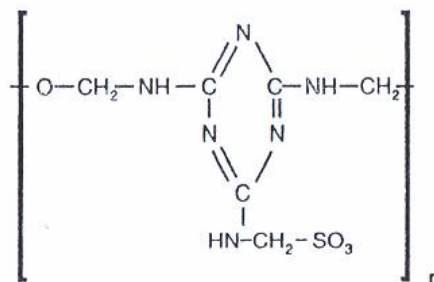


Figure I.31 : Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de polymélamine sulfoné selon Dodson, [60]

Les superplastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées et sont de ce fait relativement chers (figure I.30 et I.31) [34].

Vers la fin des années 70, les superplastifiants étaient utilisés surtout pour fluidifier les bétons en utilisant des doses réduites qui ne dépassaient pas 01 à 02 litres par mètre cube. Dans ce cas, l'action fluidifiante est limitée dans le temps, car les molécules de polymère ne se trouvent pas en nombre suffisant pour neutraliser tous les sites actifs libérés suite à la meilleure dispersion des grains de ciment (figure I.32). En outre, certaines molécules de polymère peuvent être aussi très vite fixées par les hydrates formés (figure I.33).

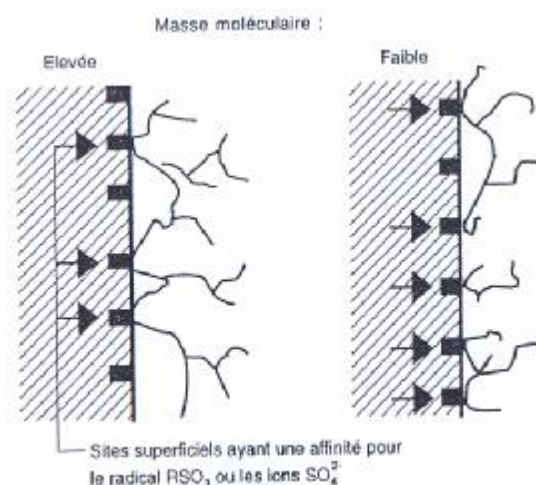


Figure I.32 : Illustration schématique du blocage des sites réactifs par les molécules d'un superplastifiant, selon Jolicoeur & al [65]

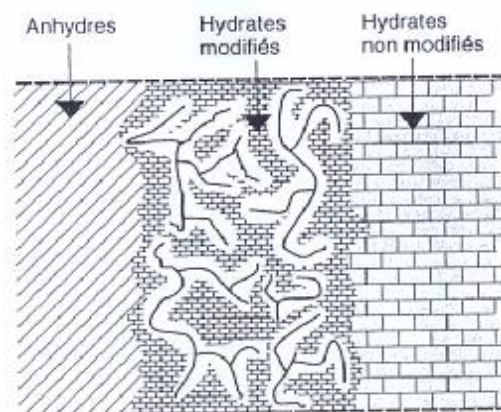


Figure I.33 : Illustration schématique de l'influence des superplastifiants sur la formation des hydrates, selon Fernon [66]

De nos jours, les superplastifiants sont utilisés à des dosages beaucoup plus élevés qui atteignent deux à vingt litres par mètre cube et permettent la confection de bétons de très grande maniabilité ou des bétons à hautes performances (figure I.34).

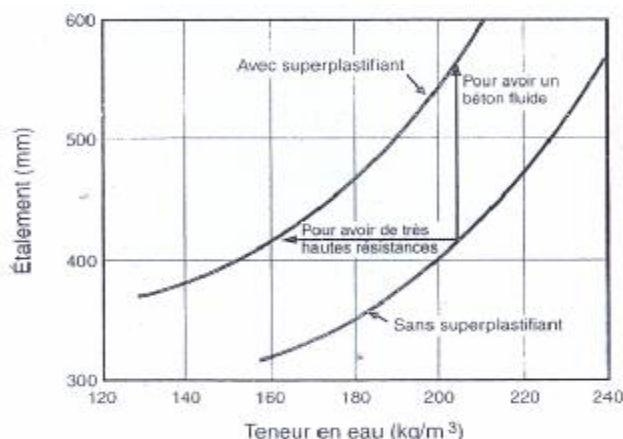


Figure I.34 : Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant, selon Meyer [67]

Pour un rapport eau/ciment et une teneur en eau donnés dans le béton, l'action dispersante des superplastifiants, augmente considérablement la maniabilité du béton sans qu'il perde sa cohésion. Un tel béton peut être mis en place avec peu ou pas de serrage et n'est sujet ni à au ressuage excessif ni à la ségrégation, d'où sa désignation de béton fluide.

La seconde utilisation des superplastifiants est la confection des bétons à maniabilité normale (figure I.35), mais ayant une très grande résistance en raison d'une réduction substantielle du rapport eau/ciment.

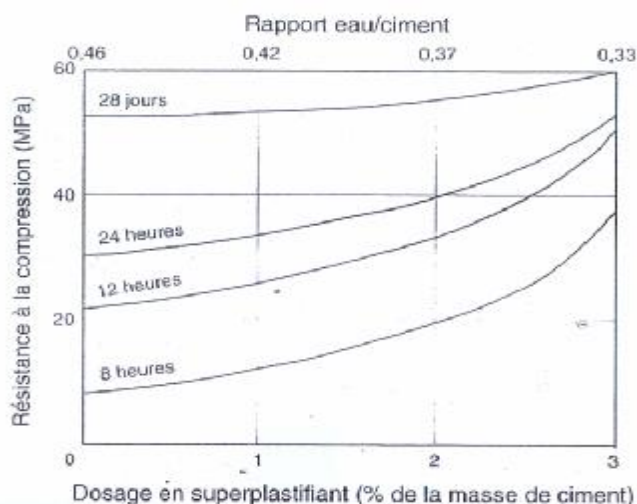


Figure I.35 : Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m³ de ciment à maniabilité constante, selon Meyer [67]

V.2. MECANISMES D'ACTION

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles viennent se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption). Ces dernières réduisent les forces attractives

d'interactions inter-particulaires de Van der Waals qui existent entre les atomes des différentes particules (figure I.36). Si les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient également les forces d'interactions de double couche qui apparaissent suite à la réaction acide-base entre les atomes de surface et le liquide, en augmentant les forces de répulsions entre les particules et engendrent donc des effets importants de fluidification ou d'épaississement des suspensions (figure I. 37).

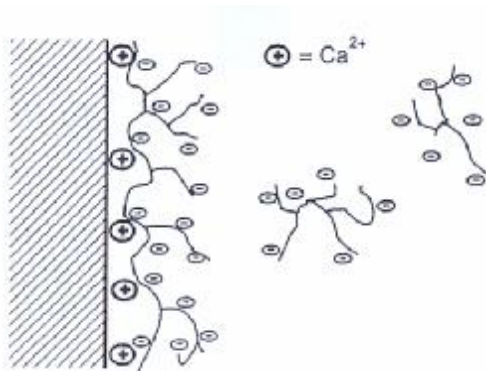


Figure I.36 : Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule selon Jolicoeur & al [65]

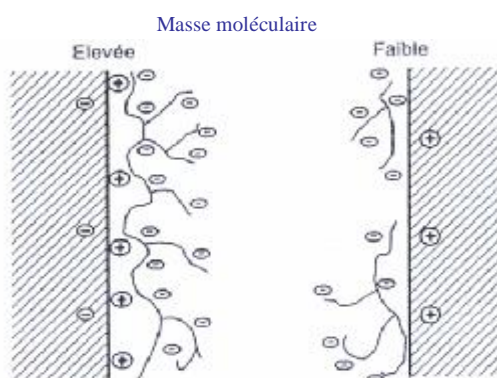


Figure I.37: Illustration schématique de la répulsion électrostatique entre deux particules selon Jolicoeur & al [65]

L'adsorption de polymères chargés négativement se fait par l'intermédiaire d'ions bivalents Ca^{2+} . La quantité de polymères adsorbés est d'autant plus grande que la masse moléculaire du polymère est élevée et qu'il y'a plus d'ions Ca^{2+} dans la solution interstitielle. Elle crée une charge négative à la surface des particules qui se repoussent (figure I.37). Cet effet ne dépend pas de la masse moléculaire du polymère, sauf dans le cas des très faibles masses moléculaires [65].

Un autre mode d'action appelé effet entropique, nécessite des molécules qu'une partie puisse se placer ou se fixer à la surface des particules et que l'autre partie puisse se déployer dans le liquide en raison de son affinité avec ce dernier. Dans ce cas, lorsque deux particules "chevelues" se rapprochent au point que les chaînes puissent s'interpénétrer, cela

provoque une augmentation de l'énergie du système associée à une force de répulsion entre les deux particules (figure I.38).

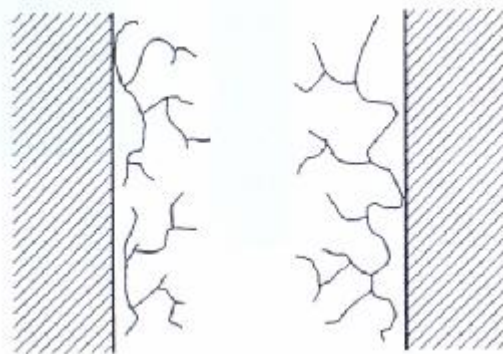


Figure I.38 : Représentation schématique du phénomène de répulsion entropique ou stérique selon Jolicoeur & al [65]

L'adsorption de grosses molécules crée des forces de répulsions, que les molécules de polymères soient chargées ou non. Les chaînes polymérisées ne peuvent pénétrer les unes dans les autres, empêchant ainsi toute floculation. Cet effet entropique s'amplifie avec la masse moléculaire et le degré de ramification du polymère [65].

Les différentes molécules de superplastifiants à longue chaîne agissent conformément aux différents mécanismes de base développés ci-dessus, en s'enroulant autour des grains de ciment et en leur conférant une charge hautement négative de sorte qu'ils se repoussent les uns des autres, conduisant à une dispersion des grains de ciment.

Les superplastifiants à base de polynaphtalène et polymélamine sulfonés agissent surtout au niveau des forces de Van der Waals et de la force d'interaction de double couche. Les superplastifiants à base de polyacrylates agissent principalement grâce à leur effet entropique.

Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline [68]. En effet, les superplastifiants constitués de molécules poly-chargées négatives, outre leur effet dispersant et leur effet secondaire retardateur, en général bénéfique, peuvent favoriser les réactions du type prise rapide. Ce comportement a pour origine l'effet inhibiteur des poly-électrolytes sur la nucléation de l'ettringite et leur aptitude à se combiner aux structures désordonnées des aluminates hydratés, dont ils favorisent la formation. Cette incompatibilité ciment–adjuvant dépend de la formulation complète du béton et notamment, le dosage en adjuvant, le rapport eau/ciment, de la compacité et de la température ambiante et peut se maîtriser complètement.

V.4. INFLUENCE DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT

Pour augmenter la maniabilité d'un béton, le dosage normal des superplastifiants est compris entre 1 et 3 litres par mètre cube de béton, pour des superplastifiants sous forme liquide contenant 40 % de matériaux actifs. Lorsque les superplastifiants sont utilisés pour réduire la teneur en eau du béton, leur dosage est beaucoup plus élevé et se situe entre 5 et 20 litres par mètre cube de béton.

Pour déterminer le dosage optimal en superplastifiant, on peut étudier la rhéologie d'un coulis ayant un rapport eau/ciment relativement faible, en mesurant l'étalement au mini cône ou l'écoulement au cône de Marsh. Les courbes obtenues pour différents dosages en superplastifiants, présentent une cassure très nette lorsque l'on atteint un certain dosage. Cette cassure est appelée point de saturation [69], et au-delà de ce point, il est inutile de rajouter du superplastifiant parce que la fluidité du coulis ne peut plus être améliorée et un dosage excessif risque de retarder indûment le durcissement du béton et de créer un phénomène de ségrégation.

L'introduction des superplastifiants dans les mélanges cimentaires a tout intérêt à se faire le plus tard possible lors du malaxage du béton. Dans ce cas, on laisse le temps au sulfate de calcium pour former une coquille d'ettringite qui bloquera temporairement l'hydratation du ciment avant que le superplastifiant soit introduit et de ce fait ses molécules n'entrent pas en compétition avec le sulfate de calcium pour réagir avec le C_3A et demeurent disponibles pour jouer leur rôle de dispersant. Ceci n'est toujours pas possible, car dans certains cas de rapport eau/ciment très faible (BHP), pour obtenir l'affaissement désiré, il est nécessaire de rajouter une quantité de superplastifiant. Dans ce cas, on procède par une double introduction en introduisant une première quantité de superplastifiant juste nécessaire pour obtenir un béton d'affaissement de 50 à 100 mm qu'on peut malaxer convenablement et on introduit le reste à la fin du malaxage [1].

Temkhajornkit et Nawa [70], ont avancé en étudiant la fluidité des pâtes de ciment contenant un superplastifiant à base de naphthalène sulfonaté, que l'introduction du superplastifiant entraîne une réduction de la contrainte d'écoulement qui tend vers zéro, mais la plasticité ne diminue pas beaucoup. Dans ce cas la pâte de ciment va avoir une bonne fluidité sans engendrer de ségrégations. Ils ont également avancé que lorsque le superplastifiant est adsorbé à la surface des particules de ciment, il change le signe du potentiel zéta de la surface des particules qui devient négatif et en augmente la valeur absolue [71]. Dans ce cas, les particules de ciment ayant le même signe du potentiel zéta, se repoussent électrostatiquement.

Lorsque l'on utilise des superplastifiants à très forts dosages, Aitcin [72] a montré que leur effet enveloppant peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment quelque soit la nature du superplastifiant, le type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains.

En outre, il a mis en évidence l'allongement de la période dormante en étudiant l'évolution de la chaleur dégagée lors de la réaction d'hydratation et a montré que plus le dosage en superplastifiant est grand et plus l'effet retardateur est prononcé.

De Larrard [73] a montré qu'en période dormante, l'hydratation se développe plus rapidement sans pour autant provoquer des changements majeurs dans le processus d'hydratation.

Ramachandran [74] a montré que plus la quantité de superplastifiant est élevée, meilleur est l'effet dispersant.

Pallière [75] a montré en étudiant l'influence de la finesse du ciment sur l'effet des fluidifiants, que ces fluidifiants agissent sur la fraction granulaire 5/20 μm du ciment qui est principalement concernée par les phénomènes de floculation et défloculation.

Hanna & al [76] ont montré en étudiant le maintien de la maniabilité des pâtes de différents ciments contenant 1 % et 2 % de naphthalène, que plus la finesse Blaine du ciment est élevée, plus faible est l'effet fluidifiant.

Uchikawa & al [77] ont montré en étudiant l'influence des superplastifiants et de certaines additions minérales sur le comportement des mélanges cimentaires, que l'ajout de superplastifiant à base de naphthalène produit une très grande dispersion de toutes les particules de ciment dans la solution aqueuse et que les additions minérales se dispersent bien sans trop flocculer au sein de la pâte de ciment.

Kadri [44] a montré en étudiant l'ouvrabilité des bétons à hautes performances, que la composition chimique du ciment et en particulier la teneur en C_3A , joue un rôle majeur sur la consistance du béton en absorbant les molécules de superplastifiants (figure I.39).

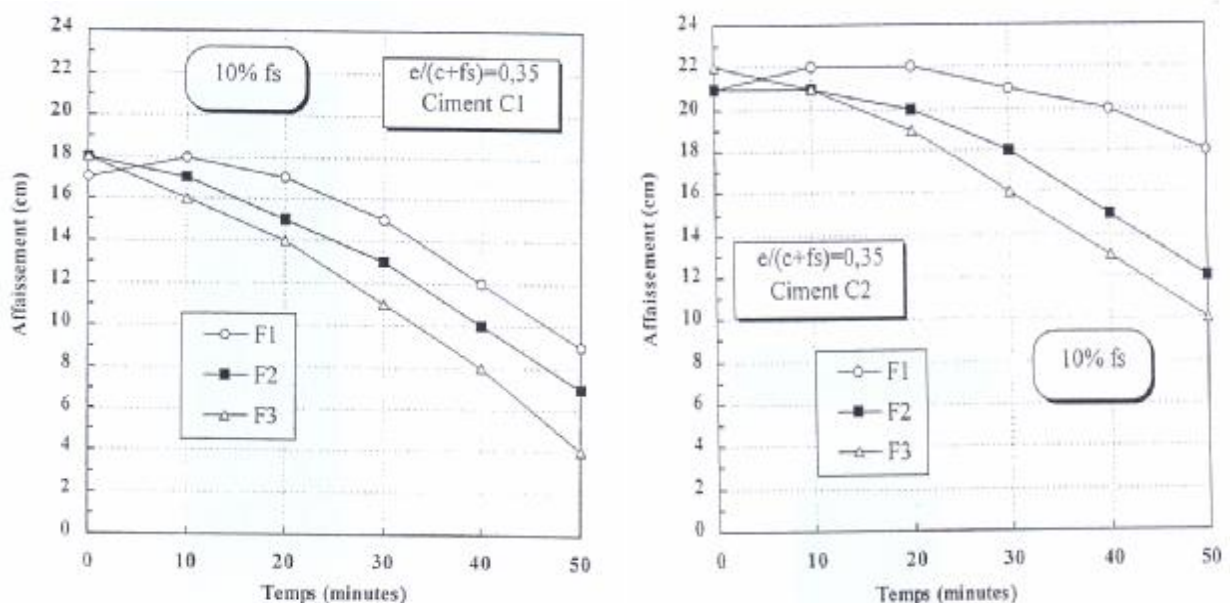


Figure I.39 : Evolution de l'affaissement d'un BHP à base de deux types de ciment en fonction du temps pour 3 superplastifiants différents, selon Kadri [44]

C1 : CPA-CEM I 52.5. C2 : CPA-CEM I 52.5 PM CP2, faible teneur en C₃A.

F1 : Superplastifiant à base de Naphtalène sulfonate. F2 : Superplastifiant à base de résine mélamine. F3 : Superplastifiant à base de résine vinyle.

En effet, les ciments à faible teneur en C₃A ont un effet favorable sur la diminution du dosage de saturation et sur la perte d'ouvrabilité au cours du temps. D'autre part, il a montré que parmi les 3 superplastifiants considérés, le naphtalène sulfonaté était supérieur en terme de dosage de saturation et maintien de la consistance du BHP au cours du temps.

Kara Ali [6] a montré en étudiant l'action de l'adjuvant fluidifiant sur la réduction du besoin en eau des mortiers avec additions, que la réduction du besoin en eau des mortiers croît avec l'augmentation du dosage en adjuvant fluidifiant indépendamment de la nature de l'addition (figure I.40).

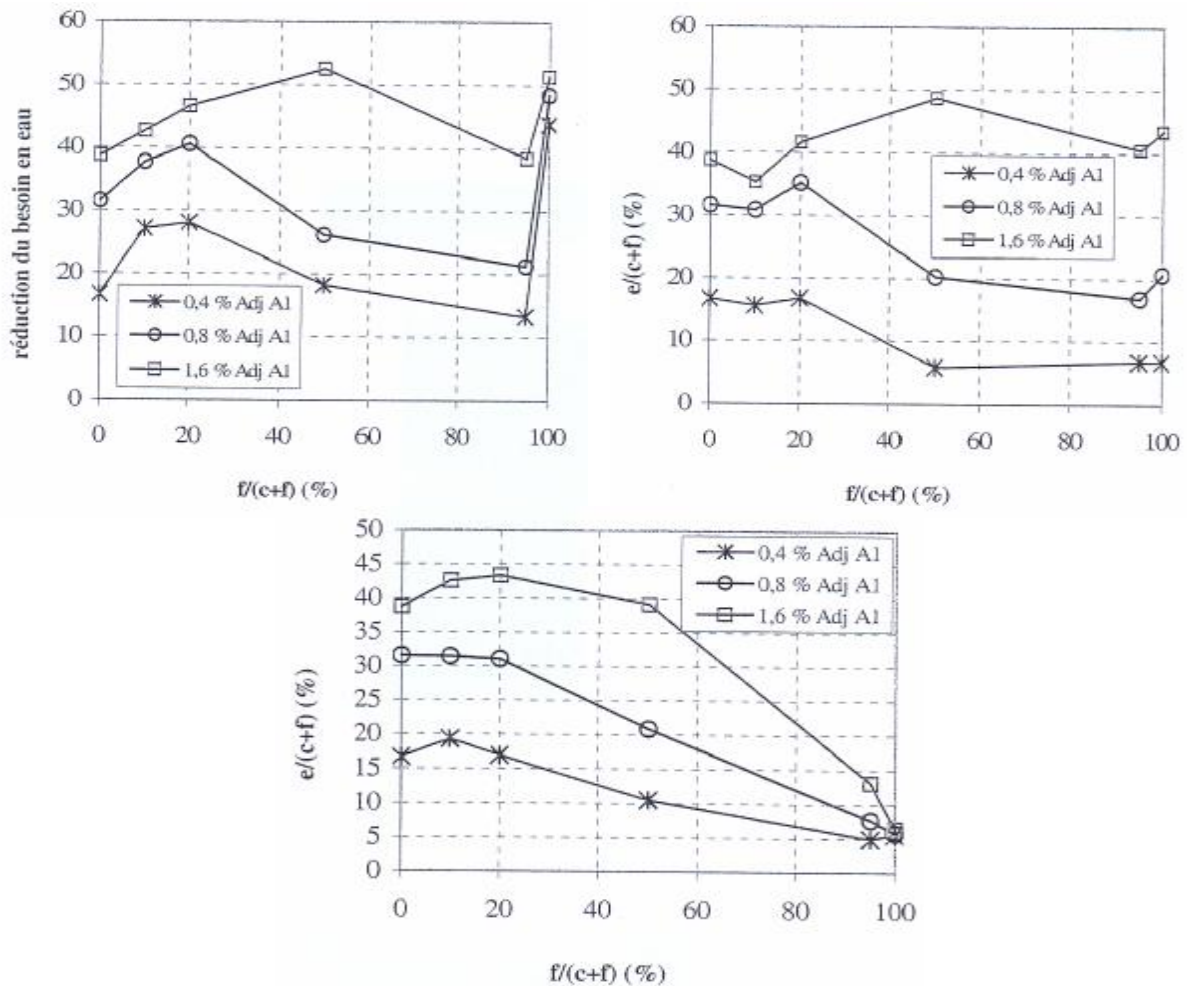


Figure I.40 : Réduction du besoin en eau des mortiers à base de CEM IIA- additions à maniabilité constante par l'adjuvant fluidifiant à base de poly-mélamine en fonction de la teneur relative en additions, selon Kara Ali [6]

a- Fumée de silice (FS01) b- Calcite précipitée (CP01) c- Diatomite (DT12)

Bessa [7] a montré en étudiant l'effet des additions minérales sur le besoin en adjuvant, que le besoin en adjuvant des mortiers nécessaire pour s'affranchir de l'effet granulaire des additions minérales dépend en premier lieu de la quantité (figure I.41) et de la finesse (figure I.42), de l'addition incorporée, indépendamment du type de ciment. Ainsi, les additions fines dont la dimension des particules est micronique et la surface spécifique limitée à 3.5 m²/g, permettent une diminution du besoin en adjuvant alors que les additions ultrafines augmentent le besoin en adjuvant.

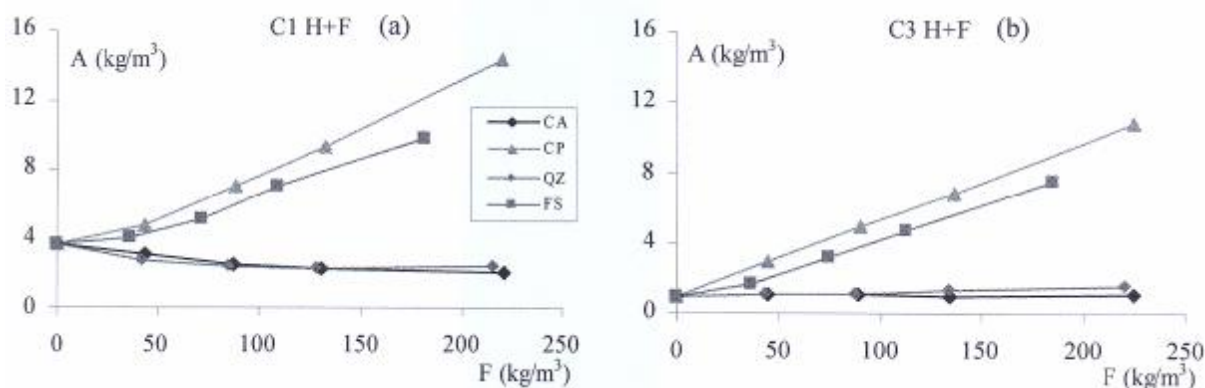


Figure I.41 : Variation du dosage en adjuvant fluidifiant des différentes séries de mortier en fonction du dosage en addition, selon Bessa [7]

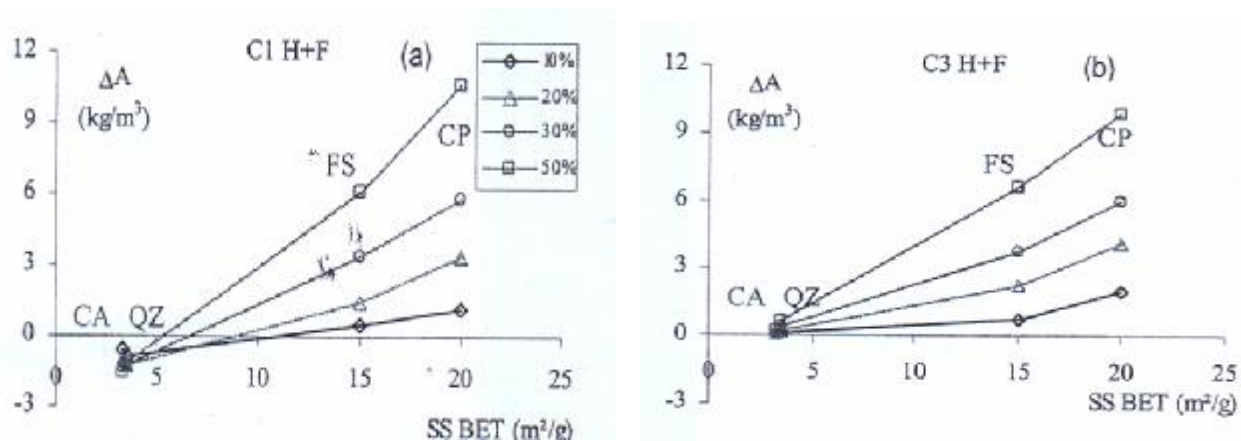


Figure I.42 : Influence de la surface BET des additions sur la modification du besoin en adjuvant des mortier, selon Bessa [7]

D'autre part, Erdogdu [78] a montré en étudiant la compatibilité des superplastifiants avec des ciments de différentes compositions, que l'effet du superplastifiant dépendait de la composition et de la quantité de ciment utilisé dans le mélange (figure I.43).

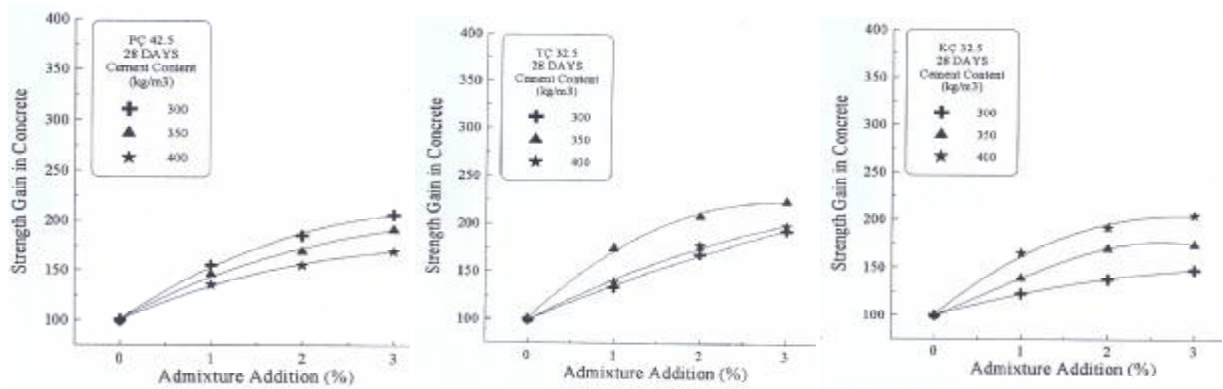


Figure I.43 : Gain en résistance en fonction de la quantité de superplastifiant pour trois type de ciment, selon Erdogdu [78]

Chandra et bjornstrom [79] ont montré en étudiant l'influence du type et du dosage en superplastifiant sur la fluidité des mortiers (figure I.44), que :

- Les superplastifiants ont des effets différents sur le comportement rhéologiques des mortiers, même s'ils sont de la même famille. Ceci est dû à leur composition de synthèse qui influence leur poids moléculaire et leur configuration chimique.
- La fluidité des mélanges cimentaires augmente avec le dosage en superplastifiants.
- L'augmentation de la fluidité des mortiers est due à l'adsorption du superplastifiant sur les particules de ciment qui retarde le processus d'hydratation du ciment.
- L'efficacité des superplastifiants a été établie dans l'ordre suivant : superplastifiant à base d'acide carboxylique, de lignosulfonate, de naphthalène sulfonate et de mélamine sulfonate.

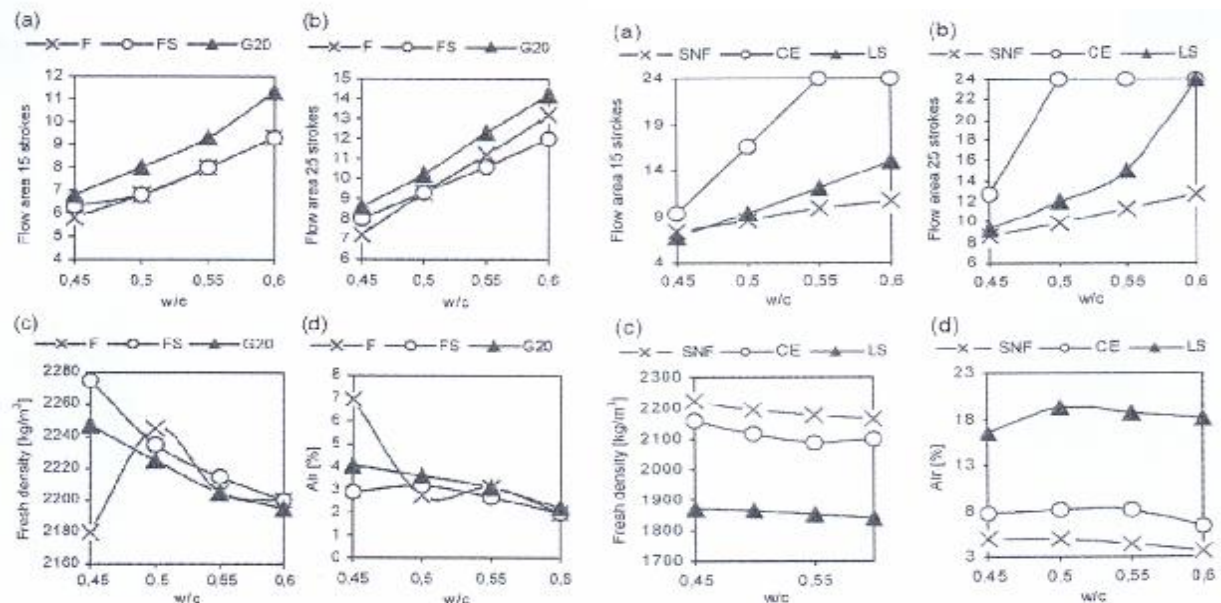


Figure I.44 : Variation de l'affaissement, densité du mélange frais et volume d'air occlus en fonction de la teneur en superplastifiant et de la teneur en eau selon Chandra et Bjornstrom [79]

F, FS, G20 : Superplastifiant à base de mélamine formaldéhyde condensé.

SNF : Superplastifiant à base de naphthalène formaldéhyde sulfonate.

LS : Superplastifiant à base d'acide lignosulfonate.

CE : Superplastifiant à base polyacrylique acide.

Ismail Aiad [80] a montré en étudiant l'influence du temps d'introduction des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment à l'état frais, que les superplastifiants à base de naphthalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et long termes et que la réduction de la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique dépend de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant dont le temps optimal était de 10 à 15 min après le début du malaxage (figure I.45).

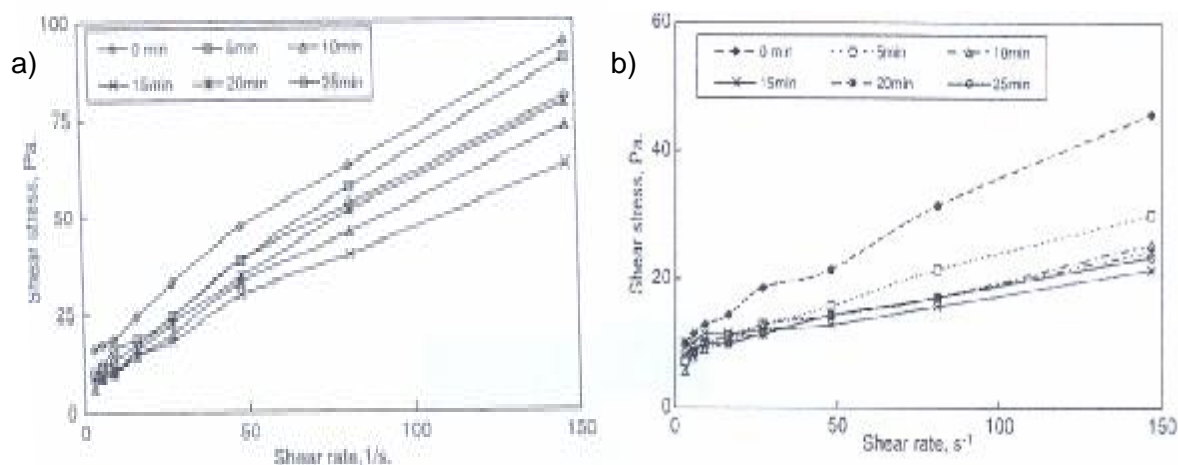


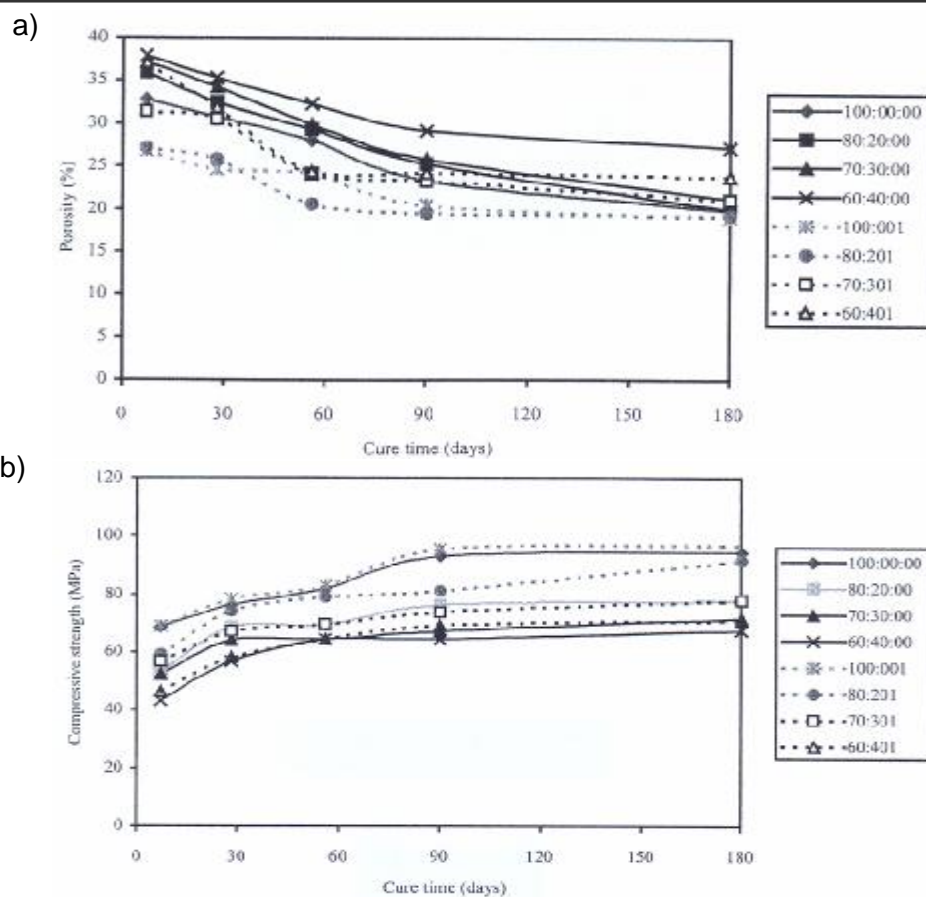
Figure I.45 : Relation contrainte de cisaillement – rapport de cisaillement des pâtes de ciment avec 1 % de superplastifiant MFS (a) et NFS (b), à différents temps d'introduction, selon Aiad [80]

MFS : Superplastifiant à base de mélamine formaldéhyde condensé.

NFS : Superplastifiant à base de naphthalène formaldéhyde sulfonate.

Adnan Çolak [81] a montré en étudiant les caractéristiques des pâtes de ciment Portland contenant différentes quantités de pouzzolane naturelle (figure I.46), que :

- La substitution du ciment par la pouzzolane engendre une augmentation du besoin en eau des pâtes de ciment à maniabilité constante. L'addition de 1 % de superplastifiant à base de naphthalène entraîne une réduction significative du rapport eau/(ciment+pouzzolane).
- L'addition de 1 % de superplastifiant tend à retarder le processus d'hydratation et de prise.
- La porosité de la pâte augmente avec le taux de substitution du ciment par la pouzzolane.
- Les résistances en compression des mélanges à 20 % de pouzzolane et 1 % de superplastifiant sont très proches de celles des pâtes de ciment sans additions.



Figurel.46: Variation de la porosité (a) et de la résistance en compression (b), des pâtes de ciment avec addition de pouzzolane naturelles avec ou sans superplastifiant selon Çolak [81]

Golaszewski et Szwabowski [82] ont montré en étudiant l'influence des superplastifiants sur le comportement rhéologique des mortiers de ciment à l'état frais en utilisant un rhéomètre rotationnel (figure I.47), que :

- Les superplastifiants à base de polycarboxylate étaient plus efficaces que les superplastifiants à base de naphthalène sur l'amélioration des propriétés rhéologiques des mélanges à l'état frais (réduction du besoin en eau et ségrégations).
- Le type de ciment (composition minéralogique et chimique) a une grande influence sur les performances des différents superplastifiants.
- La température influence les propriétés des mortiers avec superplastifiants.

Dans le même concept, Park & al [83] ont montré en étudiant les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additions minérales en utilisant le rhéomètre (figure I.48), que:

- Dans les mélanges cimentaires sans additions minérales, le dosage en superplastifiant était le facteur essentiel pour l'amélioration des propriétés rhéologiques.
- Dans les mélanges ciment - additions de laitier de haut fourneau, la contrainte résiduelle et la viscosité plastique diminuent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition.

- Dans les mélanges ciment - additions de cendres volantes, la contrainte résiduelle et la viscosité plastique augmentent légèrement en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition.
- Dans les mélanges ciment - additions de fumée de silice, la contrainte résiduelle et la viscosité plastique augmentent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition.

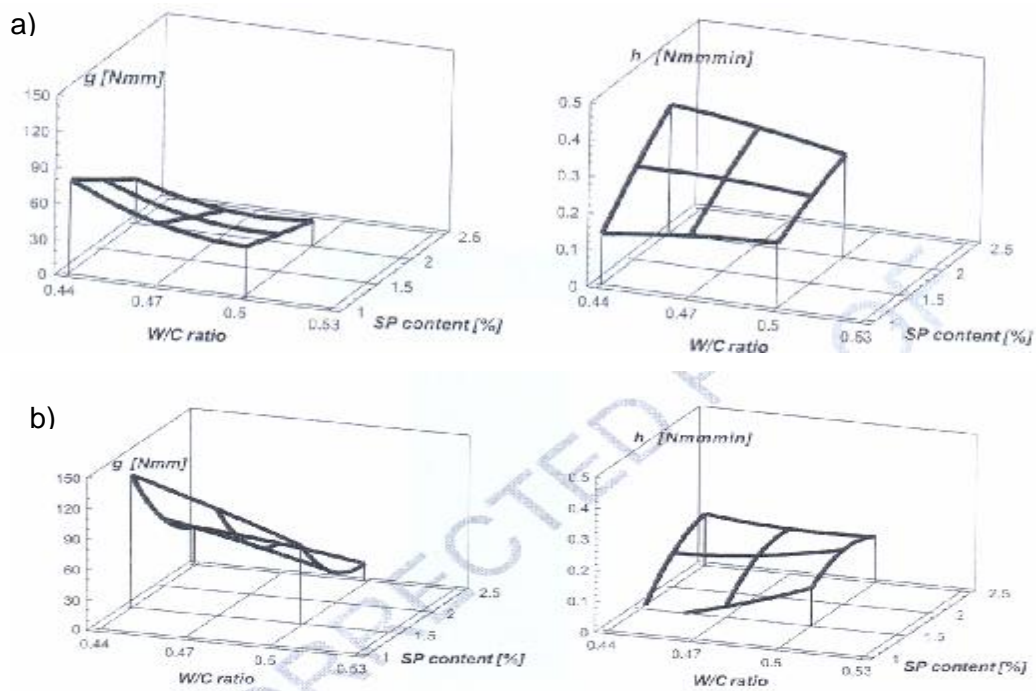


Figure I.47 : Influence du rapport E/C et le dosage en superplastifiant à bases de polycarboxylate (a) et naphtalène (b), sur les propriétés rhéologiques des mortiers après 50 min du début du malaxage, selon Golaszewski et Szwabowski [82]

g : yields value (Valeur d'écoulement) h : plastic viscosity (Viscosité plastique)

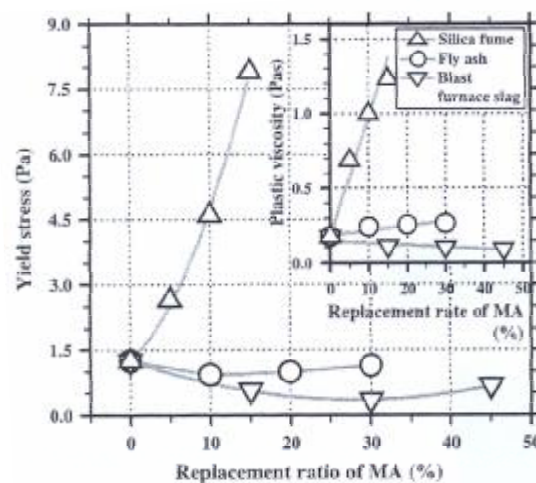


Figure I.48 : Comparaison des propriétés rhéologiques en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition minérale, selon Park & al [83]

Corradi & al [84] ont montré dans leur intervention sur les nouveaux superplastifiants pour le contrôle total des performances des bétons frais et durcis, qu'en raison de leur meilleure adsorption de l'ettringite et de leur meilleure dispersion des particules, les principales caractéristiques de ces polymers (figure I.49), sont:

- Une plus grande réduction d'eau pour l'accroissement de la durabilité,
- Une vitesse d'hydratation plus rapide pour les performances à jeune âge,
- Une maniabilité de plus longue durée pour les mises en œuvre lentes
- Un meilleur contrôle de la rhéologie des bétons pour une meilleure mise en forme.

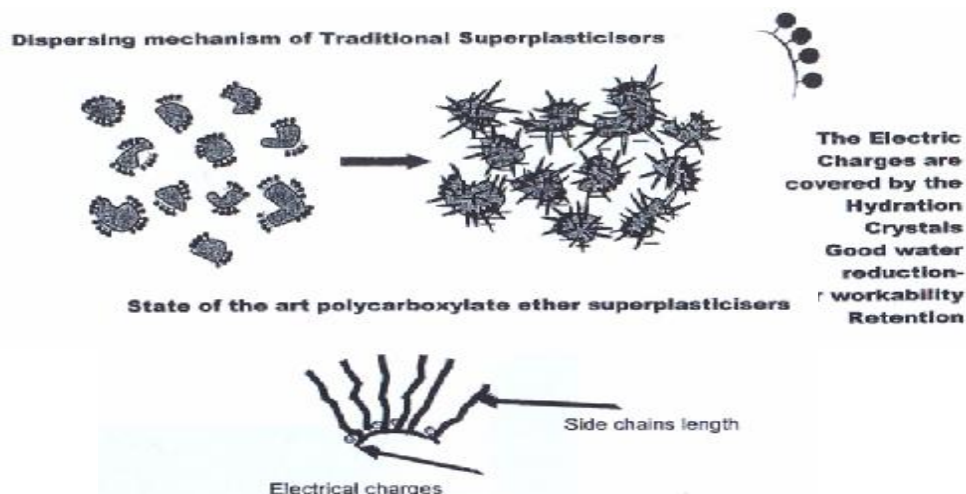


Figure I.49 : Mécanismes de dispersions des superplastifiants traditionnels et nouveaux selon Corradi & al [84]

Plank et Hirsch [85], ont montré en étudiant l'impact du potentiel zéta sur l'adsorption des superplastifiants pour l'hydratation des phases de ciment, qu'un potentiel zéta positif est nécessaire pour assurer une grande adsorption du superplastifiant. Par conséquent, l'adsorption des superplastifiants sur un grain de ciment hydraté s'effectue à l'endroit de l'ettringite cristallisée avec un potentiel zéta positif, ce qui conduit à une structure de forme mosaïque du grain de ciment hydraté avec une distribution inégale des molécules du polymer (figure I.50).

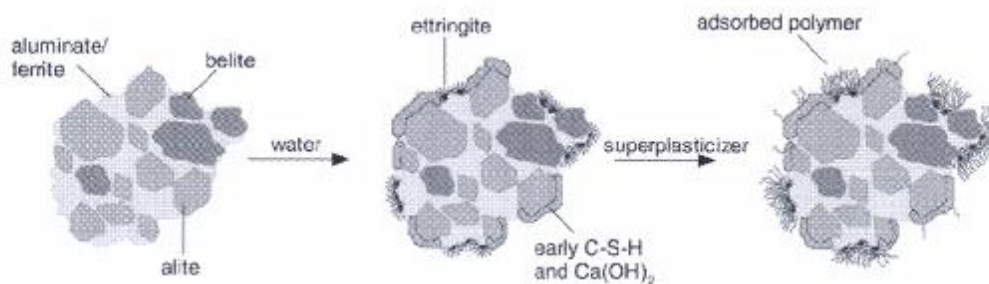


Figure I.50 : Représentation schématique de la section transversale d'un grain de ciment hydraté montrant la distribution inégale d'un polymer sur sa surface selon Plank et Hirsch [85],

Magratto & al [86] ont montré en étudiant l'amélioration de la compatibilité des nouveaux superplastifiants à base de polycarboxylates avec les ciments (figure I.51), que :

- La vitesse d'hydratation du ciment à jeune âge variait en fonction de sa composition chimique et spécialement la phase aluminatée et sulfatée, qui constituent la clé de compréhension du maintien de la fluidité,
- La nouvelle génération de superplastifiants à base polycarboxylates entraîne une forte réduction d'eau et un maintien de l'ouvrabilité optimal.

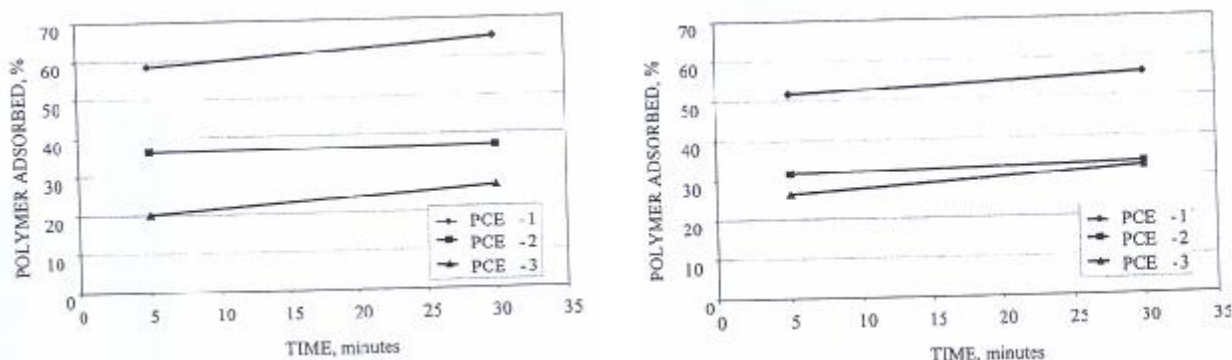


Figure I.51 : Résultats d'adsorption pour les ciments C et D, selon Magratto & al [86]
PCE 1, PCE 2 et PCE 3 : Trois superplastifiants à base de polycarboxylates

Falikman & al [87] ont montré en étudiant les performances des superplastifiants à base de polycarboxylates, que ces derniers assuraient les mêmes performances rhéologiques et mécaniques avec des dosages de 2.7 à 3.3 fois plus inférieurs que les superplastifiants conventionnels à base de poly-naphtalène.

Sakai & al [88], ont montré en étudiant l'influence des superplastifiants sur l'hydratation du ciment et la structure pores du ciment durci, que l'hydratation du ciment portland n'était pas influencée par l'addition de superplastifiants en dernier lieu.

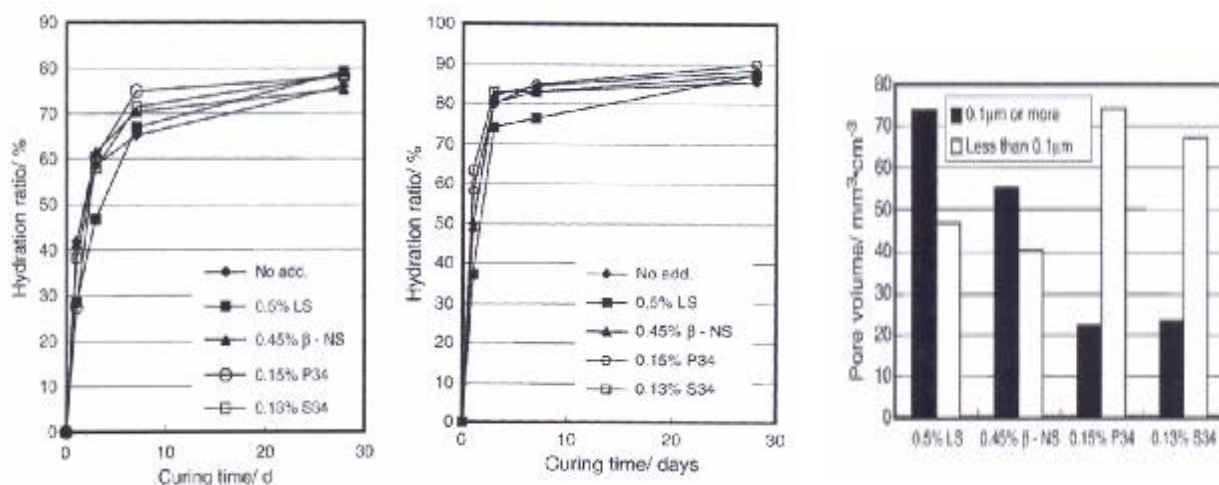


Figure I.52 : Degré d'hydratation de l'alite et du C₃A et volume des pores dans un ciment portland avec différents types de superplastifiants selon Sakai & al [88]

Ceci suppose que c'est en relation avec la dispersion des particules de ciment et par conséquent avec la structure des pores du matériau à l'état frais avec superplastifiants. Il a été montré que le volume des pores du ciment durci avec les superplastifiants à base de naphthalène et ligno-sulfonate est plus grand que celui avec superplastifiants à base de polycarboxylates (figure I.52).

En fin, les superplastifiants n'influencent pas en général le retrait, le fluage, le module d'élasticité ni la résistance au gel - dégel du béton [89,90]. De ce fait, ils n'ont pas d'effets négatifs sur la durabilité des bétons [91] et en particulier sur la résistance aux sulfates [89].

VI. SYNTHÈSE

Une addition minérale est définie par la norme européenne EN 206-1 comme étant : Un Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

La norme européenne EN 206-1 considère deux types d'additions : Les additions quasiment inertes comme les fillers et les pigments (type I) et les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent comme les cendres volantes et les fumées de silice (type II).

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons utilisés en France est établie pour les cendres volantes, les fumées de silice, les laitiers vitrifiés moulus de hauts fourneaux de classe B, les additions calcaires et les additions siliceuses de catégorie A.

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire : Un effet granulaire un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique propre à certaines additions.

L'effet granulaire appelé aussi effet filler, concerne toutes les modifications induites par la présence des additions minérales dans le squelette granulaire d'un matériau cimentaire à l'état frais. Cet effet granulaire peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires. A ce jour, on ne dispose pas encore d'une approche suffisamment construite et approfondie qui permette de prévoir l'effet que peut produire une addition donnée dans une formulation et nous ne maîtrisons pas encore les critères de choix des additions pour améliorer les propriétés rhéologiques ou la compacité d'une formulation donnée.

L'effet physico-chimique et microstructural concerne toutes les modifications engendrées par les multiples interactions entre les particules de l'addition minérale sur le processus

d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. De nombreux auteurs sont unanimes sur le fait que l'introduction des additions minérales dans un mélange cimentaire modifie le processus d'hydratation du ciment indépendamment de la nature de l'addition. L'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

L'effet chimique est lié à la composition minéralogique des additions et concerne leurs capacités caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment. La norme européenne désigne les additions chimiquement actives comme étant du type II. Néanmoins plusieurs auteurs ont confirmé l'activité chimique de certaines additions classées comme étant quasi inerte par la norme européenne EN 206-1, tels que les additions calcaires et les additions de quartz. L'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural, néanmoins, leur forte synergie rend difficile toute distinction claire entre ces deux effets.

La formulation des bétons avec additions minérales pose encore de nombreuses questions pour optimiser la quantité d'addition ou définir les critères qui permettent d'obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques requises pour le béton. La norme européenne EN 206-1 définit les conditions de prise en compte des additions minérales en substitution partielle du ciment dans la formulation des bétons en considérant le concept de liant équivalent et définit un coefficient forfaitaire, k de prise en compte des additions minérales qui est déterminé pour les cendres volantes et les fumées de silice utilisées avec un ciment de type CEM I. Pour des bétons utilisés en France, l'aptitude générale à l'emploi des additions est élargie au laitier granulé des hauts fourneaux, aux additions calcaires et aux additions siliceuses.

Les principales études réalisées dans ce domaine ont montré que la prise en compte des additions minérales dans les modèles prédictifs pour la résistance en compression doit prendre en compte les caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques et granulaires, en plus de la nature du ciment et les principaux paramètres de formulation du béton. D'autre part, l'homogénéisation des conditions expérimentales pose toujours des problèmes dus à la modification des propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires en présence d'additions. Il en résulte donc que pour bien évaluer l'effet des additions minérales du point de vue quantitatif, il est indispensable de maîtriser l'effet granulaire engendré par ces additions et de ce fait, tenir compte de la capacité d'empilement des particules de l'addition avec les autres

composants solides du squelette granulaire et de l'intensité des frictions de ces particules en présence d'eau.

Dans le cas général, l'augmentation du besoin en eau ou la diminution de la fluidité engendrés par l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires sont maîtrisées par l'utilisation des adjuvants fluidifiants qui permettent de réduire les frictions entre les composants solides du mélange et rompre la floculation des particules fines en limitant la quantité d'eau piégée dans les vides interstitiels et augmentent l'ouvrabilité du matériau cimentaire.

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement/l'étalement, ou qui produit les deux à la fois.

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles viennent se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption). Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inter particulaires de Van der Waals qui existent entre les atomes des différentes particules. Si les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient également les forces d'interactions de double couche qui apparaissent suite à la réaction acide-base entre les atomes de surface et le liquide, en augmentant les forces de répulsions entre les particules et engendrent donc des effets importants de fluidification ou d'épaississement des suspensions. Ce mode d'action concerne surtout les superplastifiants à base de poly-naphtalène et poly-mélamine sulfonés

Un autre mode d'action appelé effet entropique, et concerne essentiellement les superplastifiants à base de polyacrylates.

Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline. Ces actions dépendent de la nature du ciment, de la nature, de la quantité et de la finesse de l'addition, ainsi que de la nature du superplastifiant.

Il en résulte donc que l'utilisation combinée des additions et des superplastifiants dans les matériaux cimentaires engendre des phénomènes et des actions sur les comportements rhéologiques et mécaniques très complexes. Ces actions dépendent de plusieurs paramètres tels que, la nature du ciment, la nature, la quantité et les caractéristiques granulaires de l'addition, ainsi que de la nature du superplastifiant. Les normes européennes ne proposent pas encore de cadre méthodologique rigoureux et unique pour définir l'action des additions et des superplastifiants sur les matériaux cimentaires et

l'homogénéisation des conditions expérimentales pose toujours des problèmes. Ainsi les résultats des travaux de recherche paraissent dans plusieurs cas, contradictoires.

Nous nous proposons donc de déterminer le rôle des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur la structure et les propriétés des matériaux cimentaires et d'autre part, apporter des éléments scientifiques pour la définition d'une méthodologie de formulation avec additions minérales et adjuvants fluidifiants afin de permettre une optimisation de leur utilisation pour l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons.

Afin de répondre aux objectifs fixés par cette thèse, nous avons utilisé une méthodologie spécifique sur une série d'additions minérales différentes par leurs caractéristiques minéralogiques, granulaires, morphologiques et texturales. On devrait donc pouvoir quantifier l'influence de ces caractéristiques sur les propriétés des matériaux cimentaires avec et sans superplastifiants et appréhender ainsi les règles générales pour l'optimisation de la structure granulaire des mortiers et bétons avec additions. Parallèlement, l'évaluation de l'activité chimique des additions minérales doit fournir les éléments pour une prise en compte quantitative dans les modèles reliant les paramètres de formulation aux résistances mécaniques des matériaux durcis (Powers, Ferret, Bolomey, ...). L'accent sera mis sur l'analyse des mécanismes physico-chimiques et microstructuraux qui sont à l'origine les propriétés macroscopiques des mélanges cimentaires avec additions minérales et adjuvants fluidifiants et sur les phénomènes de dispersion et de floculation des particules fines et ultrafines dans les mélanges en présence ou non d'adjuvants fluidifiants.

METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

I. PRINCIPES DE LA METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Les études récentes qui ont considéré l'influence des additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires ont montré que celles-ci, par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, peuvent engendrer dans certains cas des modifications significatives dans les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, mais plusieurs études dans ce domaine s'accordent pour distinguer trois principaux effets qui se superposent pour influencer les propriétés du matériau cimentaire à l'état frais et durci.

- Un effet granulaire qui agit sur la compacité, le besoin en eau ou adjuvant et les propriétés rhéologiques des mélanges à l'état frais.
- Un effet physico-chimique et microstructural qui agit sur les propriétés physiques, mécaniques et microstructural des matériaux durcis.
- Un effet chimique qui résulte de la réactivité plus ou moins forte de certaines phases minérales, qui agit en complémentarité à l'effet physico-chimique et microstructural.

En proposant d'étudier l'utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons, nous souhaitons contribuer à dégager des règles plus précises pour maîtriser leurs utilisations sur des bases rationnelles. Car, outre la réponse aux besoins technologiques évidents, l'utilisation de ces additions minérales dans les matériaux cimentaires constitue aussi un enjeu économique et un défi scientifique pertinent.

Les méthodes de formulation des béton courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants (gravillon, sable et ciment) afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une ouvrabilité fixée. La validité de ces méthodes est confirmée par une expérience accumulée depuis plusieurs décennies. Cependant, ces méthodes se montrent beaucoup moins efficaces pour optimiser la composition des mélanges granulaires comportant d'autres constituants fins et ultra fins, pour lesquels d'autres phénomènes apparaissent et se traduisent sur le plan rhéologique par des variations de l'ouvrabilité et des besoins en eau lorsque les particules fines et ultra fines sont introduites dans les mélanges cimentaires.

L'étude bibliographique a montré que le principe de la valeur forfaitaire pour le coefficient k qui tient compte des effets physico-chimiques et chimiques des additions sur la résistance en compression des mortiers et bétons, définie par la norme européenne EN 206-

1, semble inadapté et de ce fait, la prise en compte des additions minérales dans les modèles prédictifs pour la résistance en compression doit prendre en compte plusieurs caractéristiques des additions telles que les caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques et granulaires, en plus de la nature du ciment et les principaux paramètres de formulation du béton.

D'autre part, il est important de noter que dans la majorité des études publiées et conformément aux textes normatifs, les additions minérales ont été introduites dans les mélanges en substitution massique du ciment. Dans ce cas, le volume absolu du liant (ciment + addition) croît proportionnellement aux taux de substitution du ciment et les modifications dans la matrice cimentaire sont d'autant plus significatives que ce taux augmente et la différence entre la densité du ciment et celle de l'addition est significative. Ainsi, dans le cas d'une substitution massique du ciment par l'addition minérale, le volume absolu du mortier augmente et le rapport volumique (eau/solide) diminue. Ces paramètres peuvent influencer les propriétés des mélanges durcis et impliquer des incertitudes dans l'évaluation des différentes actions des additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires. Mais dans le cas d'une substitution volumique du ciment, le volume absolu du mortier et le rapport volumique (eau/solide) demeure sans changement. Dans ce cas, la compacité de la structure granulaire et la porosité de la matrice cimentaire des mélanges avec additions demeurent comparables à celle du mélanges sans additions et seuls les effets des particules d'additions sont pris en compte dans la phase cimentaire.

Les méthodologies expérimentales les plus récentes ne tiennent pas compte de l'effet granulaire produit par l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires, alors qu'il peut influencer de manière significative les facteurs d'activité chimique. En effet, toutes les études ont montré que l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires, modifie leurs propriétés à l'état frais, indépendamment du mode d'introduction des additions minérales, et de ce fait, l'homogénéisation des conditions expérimentales pose toujours problème en raison de la modification des propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires en présence des additions minérales.

Dans le but de maîtriser tous ces paramètres et évaluer d'une manière plus précise les effets que peuvent engendrer les additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci, nous proposons d'utiliser une méthodologie spécifique qui est basée sur trois conditions essentielles :

- Introduire les additions dans le mélange en substitution volumique du ciment,
- Maintenir la consistance du mélange frais constante.
- Maintenir la quantité d'eau constante,

La première condition vise à garantir le maintien du volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire dans les différents mélanges. En effet, dans la majorité des études

publiées, l'introduction des additions dans le mélange est effectuée en substitution massique du ciment. Dans ce cas, si la masse volumique de l'addition est plus faible que celle du ciment, ce qui est généralement le cas, le volume absolu du liant (ciment+addition) croît proportionnellement au taux de substitution du ciment par l'addition. Si de plus, le rapport massique eau/liant reste constant, le rapport volumique eau/liant diminue et consécutivement la porosité du mélange frais. Par conséquent, les modifications dans la matrice cimentaire sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment par l'addition augmente et que l'écart entre la masse volumique absolue du ciment et celle de l'addition est significatif. Ces modifications volumiques peuvent influencer sur les résistances mécaniques et ne peuvent être évitées que lorsque les additions sont introduites en substitution volumique du ciment.

La deuxième condition vise à garantir une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire pour toutes les formulations avec ou sans additions, permettant la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire, ce qui permet de limiter éventuellement la variation du volume d'air occlus.

La troisième condition vise à garantir le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais en supposant que le volume d'air occlus dans les mortiers ne varie pas significativement.

Dans ces conditions, la porosité initiale et le volume de la matrice cimentaire des mortiers restent constants indépendamment du caractère et de l'intensité de l'effet granulaire des additions.

Dans cette étude, il paraît donc intéressant de pouvoir déterminer, en premier lieu, l'action physique des addition minérales sur les mélanges cimentaires afin d'appréhender les conditions dans lesquelles leur incorporation dans le mortier peut apporter des améliorations significatives de la compacité du squelette granulaire. Quant aux effets physico-chimiques, microstructuraux et chimique des additions, ils seront déterminées indirectement à partir de la modification de la résistance en compression des mortiers et bétons en cours de durcissement ou par l'évaluation des facteurs d'activité chimique des additions qui sont déterminés à partir des modèles prédictifs de Féret ou de Bolomey [1].

Dans la première phase, l'ouvrabilité des mélanges est conservée constante par la correction de la quantité d'eau dans le mélange sans l'utilisation des adjuvants fluidifiants. Cette partie de l'étude permettra d'évaluer d'abord l'effet granulaire des additions minérales sur le besoin en eau, la densité de l'arrangement spatial des particules à propriétés rhéologiques constantes permettant ainsi une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire qui assure la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire. L'effet physico-chimique, microstructural et chimique des additions

sera évalué indirectement à partir de la variation des résistances mécaniques et de leurs facteurs d'activité chimique.

En second lieu, la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires sera maintenue constante pour toutes les formulations afin de permettre le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais, en supposant que le volume d'air occlus dans les mélanges ne varie pas significativement. Dans ce cas, l'ouvrabilité des mélanges est conservée par l'introduction d'adjuvants superplastifiants pour maintenir l'effet granulaire des additions, et seul l'effet physico-chimique ou microstructural et éventuellement chimique des particules de l'addition dans la phase cimentaire est pris en compte [6, 7].

II. CONFECTION DU MORTIER DE REFERENCE

Pour atteindre l'objectif visé par l'étude, on a confectionné un mortier de référence sans additions dont la composition est inspirée de celle du mortier normal défini par la norme EN 196-1, avec une quantité d'eau ajustée afin d'obtenir une consistance de référence.

Les procédures suivies pour la préparation des mortiers, la confection, des éprouvettes, de stockage, et les mesure des résistances en compression ont été réalisées conformément à la norme EN 196-1.

La préparation du mortier a été réalisée en utilisant un malaxeur d'une capacité de 5 litres composé d'un récipient et d'un batteur en acier inoxydable, pouvant fonctionner à une vitesse lente de 140 tours par minute et une vitesse rapide de 285 tours par minute.

L'eau et le ciment avec ou sans additions sont introduits dans le récipient à l'arrêt, puis le malaxeur est mis en marche à vitesse lente pendant 60 secondes, puis à vitesse rapide pendant 30 secondes ; le sable étant introduit les premières 30 secondes. Pendant l'arrêt du malaxeur pendant 90 secondes, un raclage manuel des parois du récipient est effectué pendant les premières 15 secondes d'arrêt, puis le malaxeur est remis en marche à vitesse rapide pendant 60 secondes.

La consistance de référence a été évaluée en mesurant l'étalement du mortier à l'état frais sur une table à secousses. Le mortier frais étant placé dans un cône de diamètre inférieur : 100 mm, diamètre supérieur : 70 mm et de hauteur : 60 mm (figure II.1), en deux couches compactées à l'aide d'une tige métallique. Après enlèvement du cône, la table subit 30 secousses en 30 secondes et la valeur de l'étalement considéré, constitue la moyenne de la mesure de l'étalement du mélange sur deux directions perpendiculaires (figure II.1).

Pour chaque mortier ayant acquis la consistance de référence, on a préparé des éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm. La mise en place des mortiers dans les moules est effectuée en deux couches qui subissent sur une table à chocs 60 secousses en 60 secondes par couche. Les moules sont alors conservés dans une chambre humide pendant

24 heures à une température de 20 °C et plus de 95 % d'humidité relative. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées immergées dans l'eau à une température de 20 ± 2 °C, jusqu'à l'échéance de l'essai.

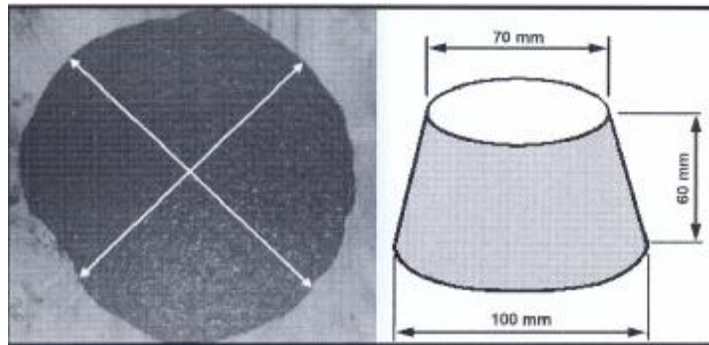


Figure II.1 : Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais

Les résistances à la traction du mortier durci ont été évaluées à 07 et 28 jours en utilisant une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN, pourvue d'un dispositif de flexion à 3 points (figure II.2). Les résistances en compression ont été évaluées à 7 et 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers (figure II.3). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

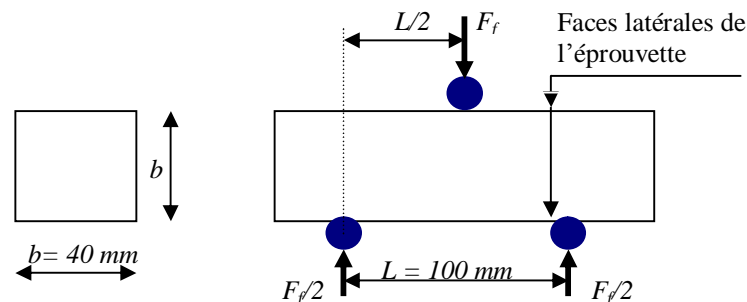


Figure II.2 : Schéma du dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de mortiers

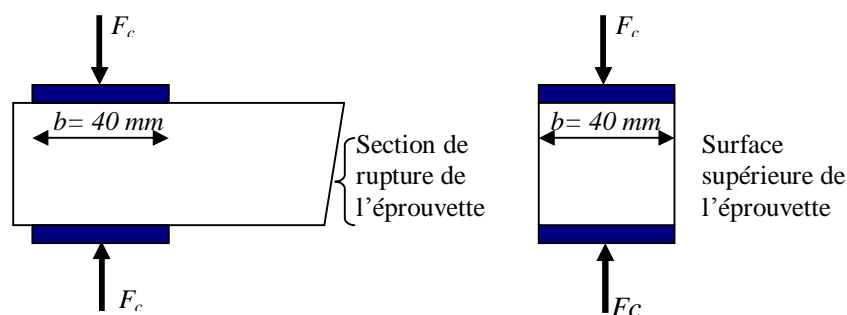


Figure II.3 : Schéma du dispositif de charge en compression pour les éprouvettes de mortiers

Dans tous les cas, les paramètres qui caractérisent les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers ont été réalisés en laboratoire à des températures de 20 ± 2 °C.

Pour la suite de l'étude, on a désigné par :

e : le volume d'eau utilisé pour obtenir un mortier ayant la consistance de référence.

l : le volume absolu de liant dans le mortier. $l = c + f$

c : le volume absolu de ciment dans le mortier.

f : le volume absolu de l'addition minérale dans le mortier.

III. MORTIERS AVEC ADDITIONS SANS ADJUVANTS

III.1. BESOIN EN EAU, COMPACTITE ET VOLUME D'AIR OCCLUS DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

Le besoin en eau des mortiers avec additions est exprimé par la variation du rapport volumique quantité d'eau par la quantité de liant (E/L), en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %); pour des mortiers à même consistance. Le taux de substitution du ciment par les additions minérales varie entre 0 et 50%.

La quantité d'eau a été ajustée à chaque fois pour tous les mortiers confectionnés pour acquérir la consistance du mortier de référence.

La variation du besoin en eau induite par l'incorporation d'une addition minérale dans un mortier permet d'évaluer l'efficacité d'insertion des particules de l'addition dans le squelette granulaire du mélange cimentaire par rapport au mortier de référence.

La compacité du squelette granulaire des mortiers à l'état frais a été déterminée pour vérifier directement la densité de l'empilement granulaire. Elle a été calculée à partir de leurs masses volumiques apparentes en tenant compte des masses volumiques absolues des constituants solides, et est exprimée en (%).

La masse volumique du mortier à l'état frais a été mesurée pour chaque formulation en remplissant manuellement un récipient de volume et de masse connus, juste après le malaxage. Le remplissage du récipient est effectué suivant le même mode de serrage que pour les éprouvettes.

La compacité du mélange frais a été déterminée en (%) sur la base de la relation suivante :

$$\text{Compacité} = 100.(c + s + f) \quad (\text{II.1})$$

c , s et f , désignent respectivement les volumes absolus au m^3 de ciment, de sable et d'addition dans le mélange, en (m^3/m^3).

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{C}{r_c} \cdot 10^3 \\ s &= \frac{S}{r_s} \cdot 10^3 \\ f &= \frac{F}{r_F} \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.2})$$

C , S , et F désignent respectivement les dosages au m^3 de ciment, de sable, et d'addition dans le mélange, en (kg/m^3) .

ρ_C , ρ_S , et ρ_F désignent respectivement les masses volumiques absolues de ciment, de sable et d'addition, en (kg/m^3) .

ρ_E désigne la masse volumique absolue de l'eau, considérée égale à $1000 kg/m^3$.

$$\left. \begin{aligned} C &= MVA \frac{M_C}{M_C + M_S + M_F + M_E} \\ S &= MVA \frac{M_S}{M_C + M_S + M_F + M_E} \\ F &= MVA \frac{M_F}{M_C + M_S + M_F + M_E} \end{aligned} \right\} \quad (II.3)$$

MVA , désigne la masse volumique apparente du mortier frais après sa mise en place dans les moules, en (kg/m^3) .

M_C , M_S , M_F et M_E désignent respectivement les masses de ciment, de sable, d'addition et d'eau utilisées lors du gâchage, en (kg) .

La porosité initiale des mortiers est déterminée comme étant le complément de la compacité et est exprimée en (%).

$$P_0 = 100 - \text{compacité} \quad (II.4)$$

Le volume d'air occlus (V_{AC}) a été calculé à partir de la compacité du squelette granulaire et de la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires en supposant que les proportions des composants solides et liquides du mélange sont celles mises en œuvre lors du malaxage.

III.2. RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS MINERALES

Pour chaque mortier ayant acquis la consistance de référence, en ajustant la quantité d'eau dans le mélange, des éprouvettes $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ont été utilisées pour la caractérisation des résistances mécaniques des mortiers à la traction et à la compression à 07 et 28 jours.

Les résultats sont exprimés en fonction du taux de substitution du ciment par les additions, puis rapportés à la résistance du mortier de référence en les exprimant par le rapport de la résistance au jour j du mortier avec addition par la résistance du mortier de référence au même jour, noté (R_j/R_r) en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %) dans le mortier.

On désignera par :

R_{c_j} : résistance en compression au jour j du mortier avec additions minérales.

R_{cr_j} : résistance en compression au jour j du mortier de référence.

R_{t_j} : résistance à la traction au jour j du mortier avec additions minérales.

R_{tr_j} : résistance à la traction au jour j du mortier de référence.

III.3. EFFETS DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES MORTIERS AVEC ADDITIONS

Lorsque une addition minérale fine ou ultrafine est incorporée dans un mélange cimentaire, elle engendre des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires soit par un effet granulaire ou/et un effet physico-chimique et microstructural ou/et un effet chimique spécifique.

Pour tenir compte de la part spécifique de ces différents effets, nous avons en premier lieu mis en évidence l'effet granulaire à caractère purement physique par rapport aux deux autres effets qui sont liés au processus d'hydratation du ciment. Cette distinction peut se faire en appliquant aux mortiers étudiés les principes du modèle prédictif de Féret [1] qui exprime la résistance en compression d'un béton à un âge donné par la relation suivante :

$$R_c = G_F f_{mc} \left(\frac{c}{c + e + v} \right)^2 \quad (II.5)$$

c , e et v désignent respectivement, les volumes du ciment, d'eau et d'air occlus dans le mortier sans additions en (l/m^3).

G_F désigne un coefficient adimensionnel qui dépend de la nature des agrégats.

f_{mc} désigne la résistance en compression du mortier normal au même âge en (MPa).

Le modèle prédictif de Féret exprime la résistance en compression d'un béton sur la base de trois facteurs supposés indépendants :

- Un facteur G_f qui tient compte l'influence des agrégats sur la résistance en compression des bétons ;
- Un facteur f_{mc} , qui tient compte la contribution de la nature et les caractéristiques du ciment sur l'évolution des résistances, exprimé directement par la résistance du mortier normal préparé avec du sable normalisé ;
- Un facteur $[(c/(c+e+v))]^2$, qui tient compte des paramètres de formulation et qui caractérise l'influence de la compacité initiale de la matrice cimentaire sur les résistances en compression. Ce facteur sera désigné par le facteur de compacité de Féret pour la suite de l'étude.

La considération de la variation des résistances en compression des mortiers avec additions en fonction du facteur de compacité permettra de mettre en évidence les

modifications engendrées par l'effet granulaire des additions sur la compacité de la matrice cimentaire indépendamment des autres effets (figure II.4). L'effet physique de l'addition peut être dans ce cas évalué en analysant la variation de la résistance relative parallèlement à l'axe des abscisses (axe du facteur de compacité) et les effets physico-chimiques et chimiques peuvent être déduits par rapport aux mortiers sans additions de facteur de compacité équivalent en analysant la variation de la résistance relative parallèlement à l'axe des ordonnées (axe des résistances relatives).

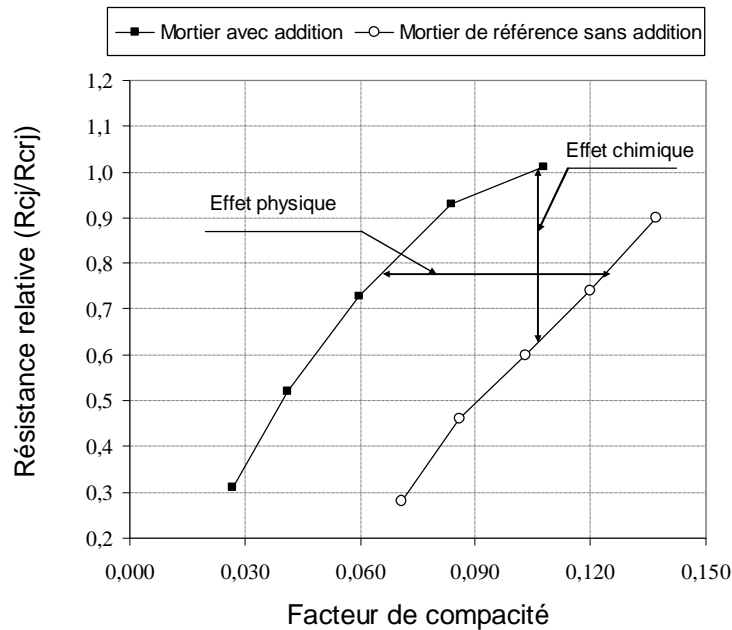


Figure II.4 : Mise en évidence des effets des additions minérales sur les résistances des mortiers

Pour distinguer l'activité chimique propre à chaque addition, nous pouvons nous baser sur la notion de liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1, comme suit :

$$L_{eq} = C + k.F \quad (II.6)$$

C , désigne la quantité de ciment dans le béton (kg/m^3),

F , désigne la quantité d'addition dans le béton (kg/m^3),

k , désigne un coefficient de prise en compte des additions minérales dans le liant.

En appliquant cette notion aux mortiers étudiés, la résistance relative en compression peut être donnée par :

$$\frac{R_c}{R_{cr}} = \frac{(l/(l + e + v))^2}{(c_r/(c_r + e_r + v_r))^2} \quad (II.7)$$

c_r , e_r et v_r désignent respectivement, les volumes du ciment, d'eau et d'air occlus dans le mortier de référence sans additions en (l/m^3).

l , e et v désignent respectivement, les volumes du liant, d'eau et d'air occlus dans le mortier avec additions en (l/m^3).

Comme le volume de liant équivalent peut être exprimé comme suit:

$$l_{eq} = c + Kf \quad (II.8)$$

Le facteur d'activité K_F peut être déduit à partir du modèle prédictif de Féret en substituant l'équation (II.8) dans l'équation (II.7):

$$K_F = \frac{c_r(e+v)\sqrt{R_c/R_{cr}}}{f[c_r(1-\sqrt{R_c/R_{cr}}) + (e_r + v_r)]} - \frac{c}{f} \quad (II.9)$$

En se basant sur le modèle prédictif de Bolomey, la résistance en compression d'un béton à un âge donné est exprimée par la relation suivante [1] :

$$R_c = G_B f_c \left(\frac{C}{E+V} - 0.5 \right) \quad (II.10)$$

C , E et V , désignent respectivement, la masse du ciment, la masse d'eau et la masse d'eau équivalente au volume d'air occlus dans le mélange en (kg/m^3).

G_B désigne un coefficient adimensionnel qui dépend de la nature des agrégats.

f_c désigne la résistance en compression du mortier normal au même âge en (MPa).

On remarque que cette relation comme celle de Féret est le produit de trois termes qui tiennent compte de l'influence des granulats, du ciment ou du liant et de la formulation du béton qui est exprimée par un facteur qui caractérise la compacité initiale de la matrice cimentaire exprimée par le rapport $[C/(E+V)-0.5]$, qu'on désignera par le facteur de compacité de Bolomey. La différence par rapport à la relation de Féret porte exclusivement sur le troisième terme, parabolique pour le modèle de Féret et linéaire pour le modèle de Bolomey.

En appliquant aux mortiers étudiés, la notion du liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1, la résistance relative en compression peut être donnée par :

$$\frac{R_c}{R_{cr}} = \frac{(L/(E+V) - 0.5)}{(C_r/(E_r + V_r) - 0.5)} \quad (II.11)$$

C_r , E_r et V_r , désignent respectivement, la masse du ciment, la masse d'eau et la masse d'eau équivalente au volume d'air occlus dans le mortier sans additions en (l/m^3).

L , désigne la masse du liant, dans le mortier avec additions en (l/m^3).

Dans ce cas le facteur d'activité K_B peut être déduit à partir du modèle prédictif de Bolomey en substituant l'équation (II.6) dans l'équation (II.11):

$$K_B = \frac{R_c C_r (E+V)}{R_{cr} F (E_r + V_r)} - \frac{C}{F} + \frac{E+V}{2F} \left(1 - \frac{R_c}{R_{cr}} \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$\left. \begin{aligned} C_r &= r_C \cdot c_r \\ C &= r_C \cdot c \\ F &= r_F \cdot f \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.13})$$

ρ_C et ρ_F désignent respectivement, les masses volumiques absolues du ciment et de l'addition.

c , c_r et f désignent respectivement, les volumes de ciment et d'additions dans le mortier.

L'analyse de la variation des facteurs d'activité K_F et K_B en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition peut nous informer sur l'activité chimique propre à chaque addition étudiée.

IV. MORTIERS AVEC ADDITIONS ET ADJUVANTS FLUIDIFIANTS

A fin de permettre une évaluation plus précise des effets physico-chimique et microstructural ainsi que l'effet chimique de chaque addition utilisée, il est nécessaire de maîtriser l'effet granulaire et de maintenir constante la compacité du squelette solide des mélanges avec additions. Pour assurer ces conditions, il faudrait introduire les additions dans le mélange en substitution volumique du ciment, maintenir la consistance du mélange frais constante et maintenir la quantité d'eau constante. Dans ce cas, l'ouvrabilité des mélanges est conservée par l'introduction d'adjuvants superplastifiants pour maintenir l'effet granulaire des additions, et seul l'effet physico-chimique ou microstructural et éventuellement chimique des particules de l'addition dans la phase cimentaire est pris en compte [6, 7]

IV.1. BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

L'introduction des additions minérales en substitution du ciment engendre généralement une augmentation du besoin en eau pour les mortiers à même consistance avec des additions dont l'effet est défavorable. L'introduction d'un adjuvant fluidifiant en quantité appropriée A , permet de contenir l'effet granulaire de l'addition sur le besoin en eau

et de ramener toutes les formulations de mortier à une quantité d'eau constante tout en maintenant inchangée la consistance du mélange frais. Dans ces conditions, l'effet granulaire de l'addition se traduit automatiquement en un besoin en adjuvant variable selon l'intensité du frottement des grains solides dans le mélange. Ce besoin en adjuvant A en (kg/m^3) de mélange est exprimé en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %); pour des mortiers à même consistance. Le taux de substitution du ciment par les additions minérales varie entre 0 et 50%.

La quantité d'adjuvant fluidifiant a été ajustée à chaque fois pour tous les mortiers confectionnés pour acquérir la consistance du mortier de référence.

La compacité du mélange frais a été déterminée sur la base de la relation (II.1) en supposant que la quantité d'adjuvant fluidifiant introduite dans le mélange étant totalement dissoute dans le mélange:

$$\text{Compacité} = 100.(c + s + f) \quad (\text{II.1})$$

c , s et f , étant définis précédemment.

Les dosages au m^3 de ciment, de sable, d'addition et d'adjuvant fluidifiant dans le mélange, en (kg/m^3) sont définis dans ce cas comme suit :

$$\left. \begin{aligned} C &= MVA \frac{M_C}{M_C + M_S + M_F + M_E + M_A} \\ S &= MVA \frac{M_S}{M_C + M_S + M_F + M_E + M_A} \\ F &= MVA \frac{M_F}{M_C + M_S + M_F + M_E + M_A} \\ A &= MVA \frac{M_A}{M_C + M_S + M_F + M_E + M_A} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.14})$$

MVA , M_C , M_S , M_F et M_E , étant définis précédemment.

M_A , désigne la masse d'adjuvant fluidifiant utilisée lors du gâchage, en (kg).

La porosité initiale des mortiers est déterminée en utilisant la relation (II.4).

Le volume d'air occlus (V_{AC}) a été calculé à partir de la compacité du squelette granulaire et de la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires en supposant que les proportions des composants solides et liquides du mélange sont celles mises en œuvre lors du malaxage.

IV.2. RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET ADJUVANTS FLUIDIFIANTS

Pour chaque mortier ayant acquis la consistance de référence, en maintenant la quantité d'eau constante dans le mélange et en ajustant la quantité d'adjuvant fluidifiant, des éprouvettes 40 mm x 40 mm x 40 mm ont été utilisées pour la caractérisation des résistances mécaniques des mortiers en compression à 7 et 28 jours.

Les résultats sont exprimés de la même manière que dans le cas des mortiers avec additions sans superplastifiants, avec :

R_{c_j} : résistance en compression au jour j du mortier avec addition et adjuvant superplastifiant.

R_{c_r} : résistance en compression au jour j du mortier de référence avec adjuvant superplastifiant.

IV.3. ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS DANS LES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET ADJUVANTS SUPERPLASTIFIANTS

En appliquant aux mortiers avec adjuvants superplastifiants les principes du modèle prédictif de Féret [1], et en se basant sur la notion de liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1, le facteur d'activité K_F peut être déduit en substituant l'équation (II.8) dans l'équation (II.7) en considérant que la porosité initiale ($e+v$) reste inchangée pour toutes les formulations de mortier avec additions et superplastifiants et qu'elle est égale à la porosité initiale du mortier de référence (e_r+v_r), car la quantité d'eau utilisée dans le mélange est constante et le serrage et le volume d'air qui en résultent sont similaires :

$$K_F = \frac{c_r \sqrt{R_c/R_{c_r}}}{f \left[\frac{c_r}{e_r + v_r} (1 - \sqrt{R_c/R_{c_r}}) + 1 \right]} - \frac{c}{f} \quad (\text{II.15})$$

De même, en se basant sur le modèle prédictif de Bolomey, le facteur d'activité K_B peut être déduit en substituant l'équation (II.6) dans l'équation (II.11) en considérant que la porosité initiale reste inchangée pour toutes les formulations de mortier avec adjuvants fluidifiants:

$$K_B = \frac{R_c C_r}{R_{c_r} F} - \frac{C}{F} + \frac{E_r + V_r}{2F} \left(1 - \frac{R_c}{R_{c_r}} \right) \quad (\text{II.16})$$

L'analyse de la variation des facteurs d'activité K_F et K_B en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition peut nous informer sur l'activité chimique propre à chaque addition étudiée.

V. ESSAIS SUR LES BETONS

Les procédures suivies pour la préparation des bétons ont été réalisées conformément à la norme NF P 18-404. Les constituants du béton sont introduits dans la cuve du malaxeur dans l'ordre suivant : gros éléments, liant et sable ; l'eau étant rajouté avec éventuellement l'adjuvant superplastifiant après 01 minute de malaxage à sec. Le malaxage de l'ensemble est poursuivi pendant 02 minutes.

L'essai de plasticité du béton frais a été réalisé conformément à la norme NF P 18-451, par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (slump test). L'essai consiste à constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. L'équipement nécessaire à l'essai comprend un moule tronconique sans fond de 30 cm de hauteur, 20 cm de diamètre inférieur et 10 cm de diamètre supérieur, une plaque d'appui, une tige de piquage et un portique de mesure. Les étapes suivies pour la réalisation de cet essai, consistent à humidifier la plaque d'appui, huiler légèrement le moule tronconique, introduire le béton dans le moule en trois couches de hauteurs égales mises en place avec la tige de piquage qui est actionnée 25 fois par couche, araser le béton sur le bord supérieur en roulant la tige de piquage horizontalement et procéder au démoulage en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu, il s'affaisse plus ou moins en fonction de sa consistance. Après 01 minute du démoulage, nous mesurons à l'aide du portique, la hauteur d'affaissement jusqu'au point le plus haut du béton frais. La mesure arrondie au centimètre, caractérise l'affaissement.

Les résistances en compression des bétons ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm, conformes à la norme NF P 18-400.

La mise en place du béton frais dans les moules a été effectuée par piquage conformément à la norme NF P 18-404.

Les moules ont été doté d'un dispositif s'opposant à l'évaporation et conservés sans être déplacées pendant 24 heures dans un local à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, jusqu'à l'échéance de l'essai.

L'essai de compression sur les éprouvettes de béton a été réalisé conformément à la norme NF P 18-406. Dans ce cas l'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance en compression est le rapport de la charge de rupture par la section transversale de l'éprouvette.

L'équipement nécessaire à l'essai de compression du béton comprend une presse de force et de dimensions appropriée répondant aux normes NF P 411 et NF P 412 et un moyen pour la rectification des extrémités des éprouvettes tels que le surfaçage au souffre. Pour réaliser l'essai de compression des bétons, on doit placer l'éprouvette séchée et rectifiée dans la

presse et la centrer en utilisant un gabarit de centrage, procéder à la mise en charge progressive et enregistrer la charge de rupture.

Si S est la section transversale de l'éprouvette en (mm^2) et P la charge de rupture en (N), la résistance f_c sera donnée en MPa à 0.5 MPa près par :

$$R_c = \frac{P}{S} \quad (\text{II.17})$$

L'essai a été réalisé sur trois (03) d'éprouvettes, et la valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

VI. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

Le but de cette thèse est l'étude des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons afin de contribuer à dégager des règles de formulation des bétons avec additions et maîtriser leur utilisation dans la réalisation des ouvrages sur des bases rationnelles. L'enjeu économique visé par cette recherche est également important ; l'utilisation des additions minérales dans le béton a pour objectif de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou co-produits industriels disponibles en Algérie. De ce fait, les additions minérales choisies pour l'étude sont courantes en Algérie, de faible coût, et sont déjà utilisées comme ajouts au ciment composé CEM II dans les différentes cimenterie du pays ; il s'agit des additions calcaires, de pouzzolanes et de laitier granulé des hauts fourneaux. Ces additions sont différentes par leurs natures minéralogiques, chimiques et morphologiques.

Pour analyser, les différents effets des additions sur les mélanges cimentaires, nous avons utilisé trois additions calcaires, deux additions de pouzzolanes naturelles de finesses différentes, et une addition de laitier granulé de haut fourneau disponibles en Algérie. Une addition ultrafine de fumée de silice, importée de France a été incluse dans l'étude pour mettre en évidence selon les cas, l'action favorable ou défavorable de l'effet granulaire.

Afin que cette étude couvre de la meilleure manière l'utilisation de ces additions minérales dans les matériaux cimentaires, nous avons utilisé à chaque fois deux types de ciments courants en Algérie. Ceci permet d'analyser l'effet de la nature du ciment sur le comportement des additions minérales dans les mélanges cimentaires ; il s'agit du ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 utilisé pour la confection des bétons courants et le ciment portland artificiel CPA-CEM I/A 42.5 utilisé pour la confection des bétons résistants aux sulfates (Ciment CRS).

La maîtrise de l'effet granulaire des additions a été réalisée par l'introduction de deux adjuvants superplastifiants hauts réducteur d'eau, conformes à la norme EN 934-2, ce qui

permettra de juger de l'influence de la nature de l'adjuvant superplastifiant sur les propriétés des matériaux cimentaires et son interaction avec les différents composants du mélange (ciment et additions).

A défaut de quantité suffisante de sable normalisé à caractéristiques constantes et afin de pouvoir étendre l'étude aux bétons, le sable utilisé pour ces travaux de thèse a été stocké en quantité suffisante pour toute la durée des travaux de recherche afin de pouvoir préserver des caractéristiques granulaires constantes pour toutes les formulations envisagées.

VI.1. CIMENT

La présente étude a été réalisée en considérant deux types de ciment utilisés à l'est de l'Algérie qui ont une finesse et une teneur en C_3S , comparables, mais sont différents par leur teneur en C_3A : Le ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 et le ciment portland artificiel CPA-CEM I ES 42.5.

Le ciment CPJ-CEM II/A est un ciment portland composé comprenant au moins 80 % de clinker, au plus 15 % d'ajouts normalisés et au plus 5 % de gypse. Ce ciment est utilisé pour les travaux en bétons, armé ou non armé préfabriqués ou précontraints, les bétons prêts à l'emploi, les produits dérivés du ciment et les mortiers pour chapes et crépis.

Le ciment CPA-CEM I ES (CRS) est un ciment portland artificiel comprenant au moins 97 % de clinker, et au plus 3 % de gypse. Ce ciment est adapté pour les travaux en milieux agressifs et convient pour les travaux de fondations, souterrains, assainissements en contact avec sols ou eaux contenant des sulfates ou d'autres composés agressifs.

Les principales caractéristiques physiques et mécaniques, la composition chimique et la composition minéralogique des deux ciments sont récapitulées dans les tableaux (II.1), (II.2) et (II.3), respectivement.

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des ciments

<i>Ciment</i>	<i>Désignation</i>	<i>Masse volumique</i>	<i>Surface spécifique</i>
		<i>Absolue (Kg/m³)</i>	<i>Blaine (cm²/g)</i>
C1	CPJ-CEM II/A 42.5	3100	3200
C2	CPA-CEM I ES 42.5	3150	3020

Tableau II.2 : Composition chimique des ciments

<i>Composants en %</i>	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>P.F</i>
C1	64.36	22.0	5.02	2.94	2.07	1.94	0.47	0.26	0.64
C2	63.91	21.62	4.49	5.37	1.66	1.92	0.25	0.08	0.81

Tableau II.3 : Composition minéralogique du clinker de base selon Bogue

Minéraux en %	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
C1	51.28	24.68	8.33	8.94
C2	52.48	22.69	2.82	16.32

VI.2. SABLE

Le sable utilisé pour toutes les formulations de cette étude, est un sable de rivière courant utilisé pour la confection des bétons ordinaires dans la région de Biskra en Algérie. Les principales caractéristiques et la granulométrie du sable utilisé sont récapitulées dans les tableaux (II.4) et (II.5).

- Dénomination : Sable de rivière
- Origine : Oued Lioua Wilaya de Biskra, Algérie.

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques du sable

Désignation	Masse volumique Absolue (Kg/m ³)	Equivalent de sable en (%)	Module de finesse
Sable de rivière	2600	78	2.5

Tableau II.5 : Granulométrie du sable utilisé

Ouverture des mailles (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5,000	0	0	0	100
2,500	207	207	10.35	89.65
1,250	177	384	19.2	80.8
0,630	380	764	38.2	61.8
0,315	790	1554	77.7	22.3
0,160	367	1921	96.05	3.95
0,080	72	1993	99.65	0.35
le fond	7	2000	100	0

VI.3. ADDITIONS MINÉRALES

Pour donner à l'étude un caractère pertinent et assez généralisé, il a été décidé de procéder aux travaux de recherche en considérant des additions minérales de finesses et de natures minéralogiques différentes disponibles en Algérie comme gisements naturels ou co-produits industriels avec une addition ultrafine ramené de France, afin de pouvoir mettre en

évidence tous les effets physiques et chimiques engendrés par les additions minérales sur les matériaux cimentaires et comparer les résultats obtenus avec les travaux de recherches nationaux et internationaux.

Pour cette étude, il a été donc utilisé quatre (04) additions minérales différentes par leurs natures minéralogiques, morphologiques et chimiques : Une addition calcaire (Ca), une addition de pouzzolane (Pz), une addition de laitier granulé vitrifié moulu de haut fourneau (La) et une addition de fumée de silice (FS). Pour analyser l'effet de la finesse des additions minérales sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires, nous avons considéré dans l'étude trois additions catégories d'additions calcaires et deux catégories d'additions de pouzzolanes différentes par leurs finesses.

Les principales caractéristiques physiques, les compositions chimiques et minéralogiques des différentes additions minérales utilisées sont récapitulées dans les tableaux (II.6) et (II.7).

Tableau II.6: Caractéristiques physiques des additions minérales

Additions	Designation	Masse volumique Absolue (Kg/m ³)	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)
Calcaire 1	Ca1	2700	3300±150
Calcaire 2	Ca2	2700	5100±270
Calcaire 3	Ca3	2700	8500±180
Pouzzolane 1	Pz1	2650	3500±200
Pouzzolane 2	Pz2	2650	5600±180
Laitier granulé de hauts fourneaux	La	2800	2900±120
Fumée de silice	FS	2240	15 (*)

(*): La finesse de la fumée de silice a été déterminée par l'essai BET et est exprimée en m²/g.

Tableau II.7: Compositions chimiques des additions minérales

Additions	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	SO ₃	P.F.
Calcaire	55.5	-	-	0.03	0.8	-	-	-	-	43.6
Pouzzolane	10,10	44,85	17,20	10,50	3,40	1,60	-	4.05	1.50	4.10
Laitier	43.01	40.8	5.2	0.53	6.4	-	3.02	-	-	-
Fumée de silice	20	79	-	-	-	-	-	-	-	1

Les additions calcaires sont obtenues par broyage d'un gisement naturel de calcite cristallisée à plus de 99 %, provenant d'un gisement de calcaire situé à Ain Touta wilaya de Batna à l'est de l'Algérie. Les particules sont de forme polyédrique sans saillies ni arrêtes vives, assimilables à une forme arrondie.

Les additions de pouzzolane sont obtenues par broyage d'un gisement naturel d'origine volcanique extraites du gisement de Bouhamdi situé à 2500 m au sud de Beni-saf à l'ouest de l'Algérie. Les particules ne présentent pas de saillies ni arrêtes vives, assimilables à une forme arrondie.

Les additions de laitier vitrifié moulu de haut fourneau sont obtenues par broyage d'un matériau coproduit industriel provenant du combinat métallurgique d'El Hadjar, wilaya de Annaba, obtenu par un refroidissement rapide dans les bassins. Ses particules sont des grains transparents clairs isotropiques désignant le verre de forme angulaire avec un aspect poreux.

Les additions de fumée de silice sont commercialisées comme additions pour la confection des bétons spéciaux en Europe. Elles sont issues des fours à arc électriques de l'industrie du ferro-silicium. Ses particules sont des sphéroïdes submicroniques de silice amorphe condensés en agglomérats de quelques micromètres.

VI.4. ADJUVANTS

Pour réaliser l'objectif de cette thèse, et afin de maîtriser l'effet granulaire des différentes additions en maintenant constante la quantité d'eau dans toutes les formulations, nous avons procédé aux travaux de recherche en considérant deux (02) adjuvants superplastifiants hauts réducteur d'eau, conformes à la norme EN 934-2, ce qui permettra de juger de l'influence de la nature de l'adjuvant superplastifiant sur les propriétés des matériaux cimentaires et son interaction avec les différents composants du mélange (ciment et additions).

- Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau SIKAFUID, noté (SP1), produit par SIKA France.

Plage de dosage recommandée : 0.4 à 2.5 % du poids du ciment ou du liant.

- Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau MEDAPLAST SP 40, noté (SP2), produit par Granitex Algérie.

Plage de dosage recommandée : 0.6 à 2.5 % du poids du ciment.

Les principales caractéristiques des adjuvants superplastifiants utilisés sont récapitulées dans le tableau (II.8).

Tableau II.8: Caractéristiques des superplastifiants utilisés

Caractéristiques	Forme	Couleur	Densité	pH	Teneur Cl ⁻	Extrait sec
SIKAFUID	Liquide	Marron foncé	1.20±0.02	7.5±1.5	< 0.1%	40±2 %
MEDAPLAST SP 40	Liquide	Marron	1.20±0.01	8.2	< 1 g/l	40 %

CARACTERISATION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A L'ETAT FRAIS

I. INTRODUCTION

Les études récentes relatées dans le chapitre I, ont montré que l'incorporation des additions minérales dans les mélanges cimentaires peut engendrer dans certains cas des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires.

L'approche méthodologique utilisée pour cette étude consiste en premier lieu en la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mortiers dont le volume absolu de l'ensemble des phases solides constituantes demeure constant et l'ouvrabilité des mélanges est conservée par la correction de la quantité d'eau dans le mélange. Dans ce cas, le volume absolu du mortier et le rapport volumique (eau/solide) demeure sans changement, la compacité de la structure granulaire et la porosité de la matrice cimentaire des mélanges avec additions demeurent comparables à celle du mélange sans additions et seuls les effets des particules d'additions sont pris en compte dans la phase cimentaire.

Pour atteindre l'objectif visé par l'étude, nous avons mesuré tous les paramètres qui caractérisent les propriétés rhéologiques des mortiers et nous nous sommes particulièrement intéressés aux propriétés suivantes:

- Le besoin en eau des mortiers à même consistance ;
- la compacité des mélanges frais des mortiers à même consistance ;
- Le volume d'air occlus des mortiers à même consistance ;

Le travail expérimental a été conduit en considérant deux types de ciments couramment utilisés à l'Est Algérien, afin d'étudier l'effet de la nature du ciment sur les propriétés des mortiers avec additions.

Pour les besoins de l'étude des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des mortiers avec additions sans superplastifiants, nous avons réalisés pour les deux ciments, 96 formulations. Chaque formulation a nécessité en moyenne 03 gâchées, qui ont été testées sur la table à secousses pour mortiers pour conférer au mélange la consistance de référence.

Pour chaque formulation, nous avons confectionné 03 éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm, qui ont été testés en flexion, ce qui a entraîné 96 essais de flexion. 03 éprouvettes résultantes ont été testées en compression à 07 jours et 03 autres à 28 jours, ce qui a entraîné 192 essais de compression.

II. CONFECTION DES MORTIERS DE REFERENCE

La composition du mortier de référence sans additions a été inspirée de celle du mortier normal défini par la norme EN 196-1, avec une quantité d'eau ajustée afin d'obtenir une consistance de référence.

Les procédures suivies pour la préparation des mortiers, la confection, des éprouvettes, de stockage, et les mesure des résistances en compression ont été réalisées conformément à la norme EN 196-1 comme il a été exposé dans le paragraphe II chapitre II.

La vérification de la consistance de référence a été réalisée conformément à la méthodologie exposée dans le paragraphe II chapitre II.

Un mortier de référence a été confectionné pour le ciment C1 : CPJ-CEM II/A 42.5 et un deuxième mortier de référence, pour le ciment C2 : CPA CEM I/A 42.5 (CRS), en utilisant :

- 450 g de ciment, correspondant à un volume dans le mélange de 145.16 cm³ pour le ciment C1 et 142.86 cm³ pour le ciment C2. Ces volumes correspondent aux volumes de référence du liant avec ou sans additions.
- 1350 g de sable ordinaire (0-5), correspondant à un volume de 519.23 cm³ dans le mélange et qui est maintenu constant pour toutes les formulations avec ou sans additions.
- Une quantité d'eau qui a été ajustée jusqu'à l'obtention de la consistance de référence qui a été choisie égale à un étalement de 115 mm sur la table à secousses pour mortiers. La consistance de référence a été choisie pour formuler un mortier plastique qui laisse une marge de maniabilité pour les différents mortiers avec additions.

Les résultats obtenus pour les mortiers de référence sont récapitulés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 : Résultats des mortiers de référence à bases des ciments C1 et C2.

Mortier	C1	C2
Etalement (mm)	115	115
Besoin en eau (l/m³)	245.2	241.9
Compacité (%)	69.08	71.66
Volume d'air occlus (l/m³)	36.82	34.62
Résistance en compression R_{c7} (MPa)	30.65	29.83
Résistance en compression R_{c28} (MPa)	41.92	43.80
Résistance à la traction R_{t7} (MPa)	3.13	3.01
Résistance à la traction R_{t28} (MPa)	4.41	4.29

Les résultats obtenus pour les deux mortiers de référence indiquent que :

- le besoin en eau du mortier de référence à base du ciment C1 à même consistance est supérieur de 1.4 % par rapport à celui du mortier de référence à base du ciment C2,
- la compacité du mortier de référence à base du ciment C1 est inférieure de 3.7 % par rapport à celle du mortier de référence à base du ciment C2,
- Le volume d'air occlus du mortier de référence à base du ciment C1 est supérieur de 6.4 % par rapport à celui du mortier de référence à base du ciment C2,
- la résistance en compression à 07 jours du mortier de référence à base du ciment C1 est supérieure de 2.7 % par rapport à celle du mortier de référence à base du ciment C2,
- la résistance à la traction à 07 jours du mortier de référence à base du ciment C1 est supérieure de 4 % par rapport à celle du mortier de référence à base du ciment C2,
- la résistance en compression à 28 jours du mortier de référence à base du ciment C1 est inférieure de 4.5 % par rapport à celle du mortier de référence à base du ciment C2.
- la résistance à la traction à 28 jours du mortier de référence à base du ciment C1 est inférieure de 2.8 % par rapport à celle du mortier de référence à base du ciment C2.

Pour constituer une fonction de référence aux mortiers avec additions, nous avons procédé à la substitution volumique progressive du ciment par le sable dans les mortiers de référence jusqu'à des taux de 50 % et on a relevé l'effet de cette substitution sur le besoin en eau, la compacité, le volume d'air occlus et les résistances mécaniques des mortiers sans additions (SA), à base des ciments C1 et C2, au même titre que pour l'étude des mortiers avec additions.

III. BESOIN EN EAU DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

La substitution du ciment par des additions minérales, volume par volume en préservant un volume absolu des composants solides constant, engendre une variation de l'ouvrabilité du mélange frais caractérisée par l'étalement sur la table à secousses des mortiers.

La variation de l'étalement pour les mortiers à base des ciments C1 (CPJ-CEM II/A 42.5) et C2 (CPA CEM I/A 42.5) est représentée par la figure (III.1).

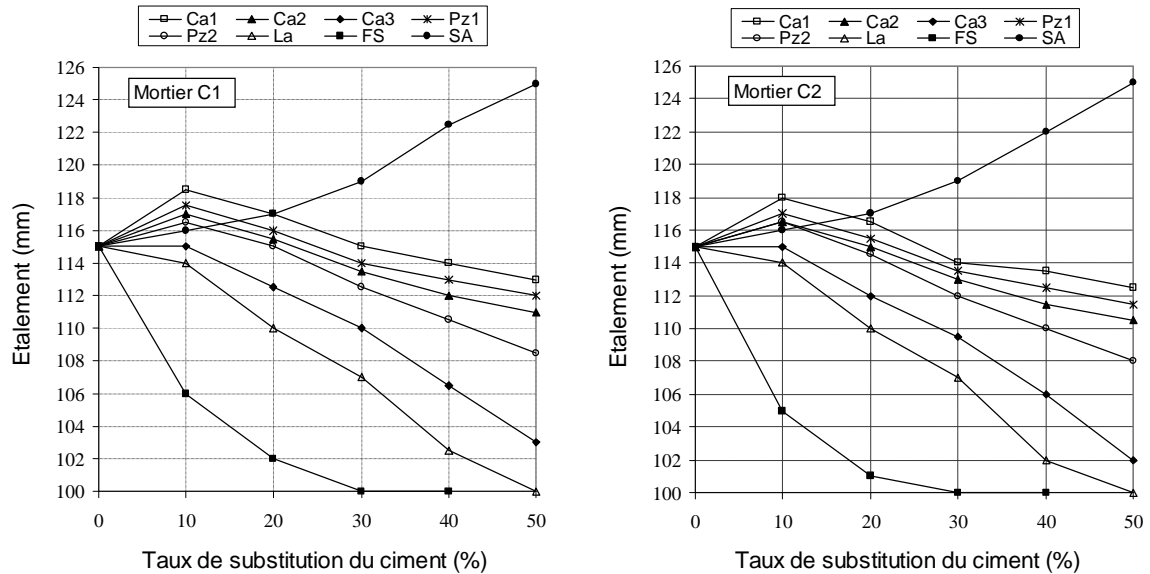


Figure III.1 : Variation de l'étalement sur la table à secousses des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Nous constatons sur la figure (III.1), que le comportement des mortiers C2 avec additions à l'état frais sur la table à secousses est similaire à celui des mortiers C1 avec additions. La consistance des mortiers C1 et C2 avec additions, dépend de la nature, de la quantité et de la finesse de l'addition incorporée dans le mélange.

Nous pouvons remarquer aussi, que l'étalement du mortier frais avec additions calcaires et pouzzolanes (Ca1, Ca2, Pz1 et Pz2), croît jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange pour les deux ciments utilisés. Ceci suggère, que l'incorporation de ces additions dans les mortiers C1 et C2 à faibles taux de substitution du ciment, améliore l'ouvrabilité des mélanges cimentaires, puis deviennent plus fermes à plus forts taux de substitution. Les mortiers frais avec additions calcaires (Ca3), de laitier (La) et de fumée de silice (FS), présentent un étalement qui décroît directement avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, pour les deux ciments utilisés. Ceci suggère, que l'incorporation de ces additions dans les mortiers C1 et C2 rend les mélanges cimentaires beaucoup plus fermes. Le mortier sans additions présente un comportement différent. En effet la substitution du ciment par le sable engendre une amélioration continue de l'ouvrabilité.

Pour donner aux mortiers avec additions minérales la consistance de référence, la quantité d'eau dans les mélanges doit être ajustée. Ceci entraîne une variation du besoin en eau des mortiers à même consistance définie dans le chapitre précédent par la variation du rapport volumique de la quantité d'eau par la quantité de liant (e/l) et évaluée en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %).

Nous pouvons constater sur la figure (III.2) que le ciment modifie peu les propriétés rhéologique des mortiers avec additions à l'état frais, ce qui entraîne que le besoin en eau des mortiers C2 avec additions minérales varie de la même manière que celui des mortiers C1 avec additions, et le classement relatif aux besoins en eau des mortiers avec les différentes additions fines et ultrafines pour les deux ciments étudiés reste concordant. Nous pouvons aussi remarquer que le besoin en eau du mortier de référence C1 est légèrement plus important que celui du mortier de référence C2. Le besoin en eau des mortiers avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange.

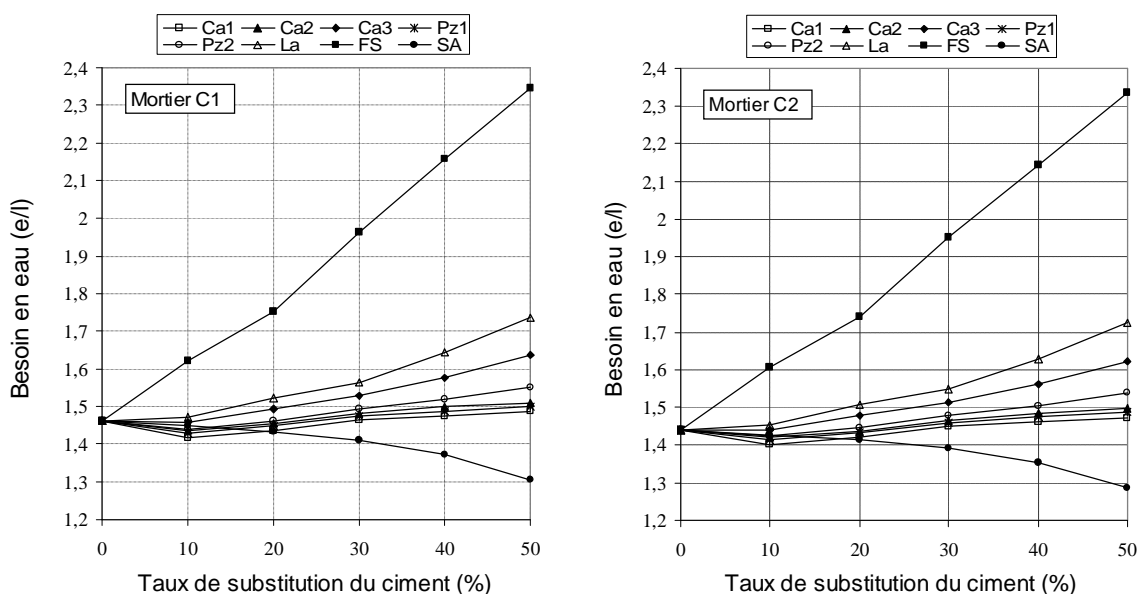


Figure III.2 : Variation du besoin en eau des mortiers C1 et C2 à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Les mortiers avec additions calcaires, et pouzzolanes (Ca1, Ca2, Pz1 et Pz2), de finesse inférieure à $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ présentent un besoin en eau plus ou moins proche de celui du mortier de référence et sont caractérisés par un besoin en eau plus faible que ce dernier pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 20 %, pour les deux ciments utilisés. Ce comportement indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les mortiers avec additions minérales fines à faibles taux de substitution du ciment. Les particules de l'addition viennent dans ce cas remplir une partie de la porosité inter-granulaire du squelette solide et libérer l'eau remplissant habituellement ces pores. Ainsi la quantité d'eau nécessaire à la lubrification des particules pour donner au mélange la consistance de référence se trouve réduite. A plus forts taux de substitution du ciment par ces additions, le besoin en eau croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais reste proche de celui du mortier de référence.

Les mortiers avec additions calcaires (Ca3) de finesse 8500 cm²/g et les mortiers avec additions de laitier granulé de hauts fourneaux, présentent un besoin en eau qui croît avec le taux de substitution du ciment, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Cette différence de comportement pour les mortiers avec additions calcaires (Ca3) est probablement due à leur finesse qui se situe entre les additions fines et ultrafines qui peuvent obéir dans ce cas aux phénomènes de floculation. Le comportement des mortiers avec additions de laitier granulé des hauts fourneaux de finesse 2900 cm²/g, est probablement dû à l'irrégularité et à l'aspect poreux de ses particules, qui n'arrivent plus à remplir les pores du squelette granulaire ou absorbent des quantités d'eau complémentaires qui peut se traduire par un plus fort besoin en eau, à même consistance. Il a été en effet démontré [7,13,17], que pour des surfaces spécifiques comparables, les additions de formes irrégulières présentent des besoins en eau plus importants que les additions de formes angulaires ou arrondies. De ce fait, les additions de laitier, de forme irrégulière demandent une lubrification plus importante que les additions calcaires ou de pouzzolanes de même finesse.

On peut également noter que les mortiers avec fumée de silice (addition ultrafine), présentent les besoins en eau les plus importants en accord avec sa grande finesse, pour les deux ciments utilisés. Ce besoin en eau est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment est grand et que la quantité des particules ultrafines dans le mélange est importante. Cette plus grande quantité d'eau dans les mortiers avec additions de fumée de silice est nécessaire à la lubrification des particules ultrafines et leur dispersion dans l'eau de gâchage pour donner au mélange la consistance de référence.

Les mortiers sans additions présentent un besoin en eau décroissant, ce qui suggère un arrangement favorable de la structure granulaire, lorsque le ciment est substitué par les grains de sable plus grossier.

Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par Kara Ali [6], Bessa & al [7], Yijin & al [23], Zhang et Han [24] et Gallias & al [25], quant à l'effet favorable ou défavorable des additions minérales dans les matériaux cimentaires en fonction de la nature, quantité et finesse des additions incorporées. Mais ces résultats diffèrent en partie de ceux obtenus par d'autres études. En effet Lewandowski [15] a montré que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes. Lange & al [16], ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau et augmentait la fluidité du mélange. Collins et Sanjayan [18], ont rapporté que la fluidité d'un béton contenant du ciment au laitier était améliorée en remplaçant une partie du ciment par des additions ultrafines. Bajou & al [19], ont montré

aussi que l'incorporation d'une addition ultrafine de cendres volantes de surface spécifique 740 m²/kg, améliorerait la fluidité et réduisait le besoin en eau du mélange à consistance normale. Kronlof [20], a montré que l'incorporation dans une formulation de béton de trois additions de quartz de finesses différentes conduit à la diminution du besoin en eau en relation avec le dosage et la finesse du matériau de substitution. Kwan [21] et De Larard & al [22], ont montré que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant.

La similitude de comportement entre les mortiers C1 et C2 avec additions est probablement due au fait que les deux mortiers de référence présentent le même rapport volumique ciment/solide et la même consistance, c'est-à-dire que la structure du squelette granulaire et l'intensité des frictions entre les particules restent similaires.

Il en résulte donc que pour les faibles taux de substitution de ciment par les additions minérales fines, le besoin en eau des mortiers avec additions est directement liée aux phénomènes de l'empilement granulaire, et donc à la compacité des mélanges à l'état frais, alors que pour les mortiers avec additions ultrafines, la petite dimension des particules des additions les rend beaucoup plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide. Ce comportement est peu influencé par la nature du ciment.

IV. COMPACTITE DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

La compacité du squelette granulaire des mortiers à l'état frais a été déterminée pour vérifier directement la densité de l'empilement granulaire. Elle a été calculée à partir des masses volumiques apparentes des mortiers à l'état frais, en tenant compte des masses volumiques absolues des constituants solides, et est exprimée en (%).

Nous remarquons sur la figure (III.3), que la compacité du mortier de référence C1 est légèrement inférieure à celle du mortier de référence C2, mais le comportement global des mortiers C1 et C2 avec additions reste comparable, en étant peu sensible à la nature du ciment. La compacité de la structure granulaire pour les mortiers avec additions minérales est directement liée au besoin en eau et suit une variation opposée ; ceci reste parfaitement visible malgré la présence du sable qui tend à atténuer l'ampleur relative des variations de la densité de l'empilement granulaire dans le mélange. La compacité des mortiers avec additions minérales fines reste comparable à celle des mortiers de référence, l'optimisation observée du besoin en eau pour les faibles taux de substitution du ciment pour les additions calcaires et de pouzzolanes peut être expliquée par le relatif gain de compacité enregistré par les mortiers avec ces additions fines. La compacité des mortiers avec fumée de silice est

décroissante en raison de l'influence des forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide.

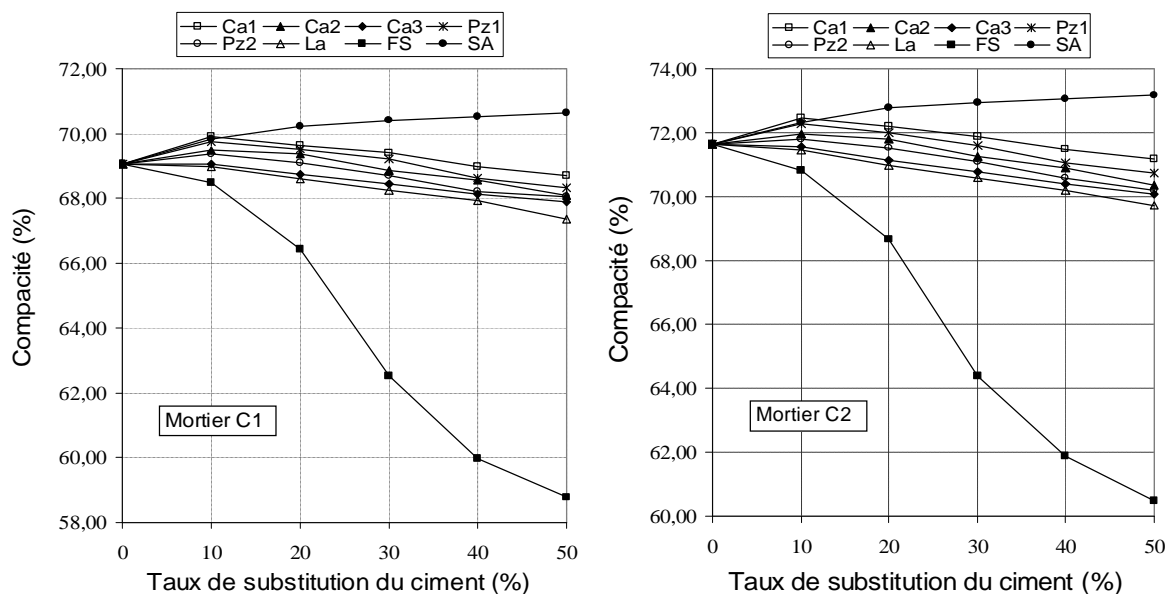


Figure III.3 : Variation de la compacité des mortiers C1 et C2 à l'état frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

La très bonne correspondance entre le besoin en eau et la compacité dans les mortiers avec additions minérales pour les deux ciments utilisés, est liée au fait que le serrage de la structure granulaire des mortiers lors de la mise en place dans les moules reste équivalent, indépendamment de la nature et des caractéristiques des additions minérales, et ce, en raison du maintien de la même consistance pour tous les mélanges frais. Ceci peut être confirmé par le calcul du volume d'air occlus dans les mortiers.

V. VOLUME D'AIR OCCLUS DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

Le volume d'air occlus a été calculé à partir de la compacité du squelette granulaire et de la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires en supposant que les proportions des composants solides et liquides du mélange sont celles mises en œuvre lors du malaxage.

Nous remarquons sur la figure (III.4) que le volume d'air occlus dans tous les mortiers C1 et C2 avec additions minérales est limité dans un domaine assez réduit et acceptable, entre 23 et 37 l/m³ (2.3 et 3.7 %), ce qui justifie la très bonne correspondance entre la variation du besoin en eau et la compacité.

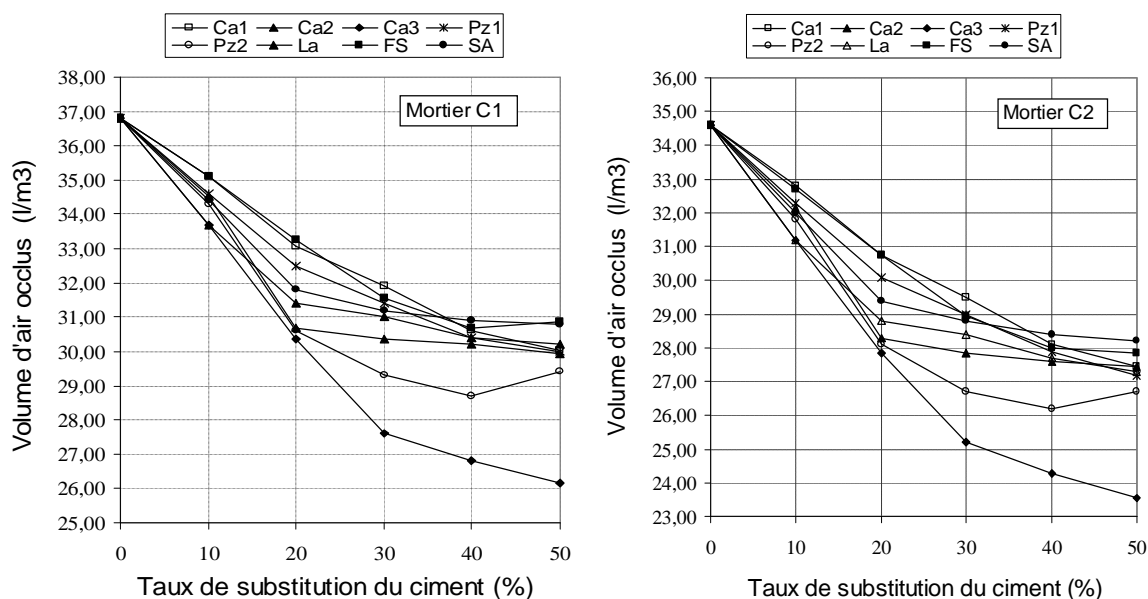


Figure III.4 : Variation du volume d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 à l'état frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

La variation entre ces bornes reste tributaire d'un comportement inter-particulaires assez complexe qui dépend de la quantité d'additions dans le mélange, mais reste peu sensible à la nature du ciment.

VI. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A L'ETAT FRAIS

Les résultats exposés précédemment montrent que les propriétés des mortiers avec additions à l'état frais étaient peu sensibles à la nature du ciment.

Toute fois, cette influence peut être analysée en représentant la corrélation du besoin en eau, de la compacité et du volume d'air occlus des mortiers C1 avec additions par rapport aux mortiers C2 avec additions.

VI.1. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LE BESOIN EN EAU DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

La corrélation du besoin en eau des mortiers C1 et C2 avec additions peut être représentée par la figure (III.5). Nous remarquons que tous les points expérimentaux des besoins en eau des mortiers C1 et C2 avec additions, se placent légèrement à droite de la bissectrice du côté de l'axe des besoins en eau des mortiers C1, et suivent une droite qui lui est presque parallèle. Ceci montre que le besoin en eau des mortiers C1 avec additions à même consistance est toujours légèrement plus fort que celui des mortiers C2.

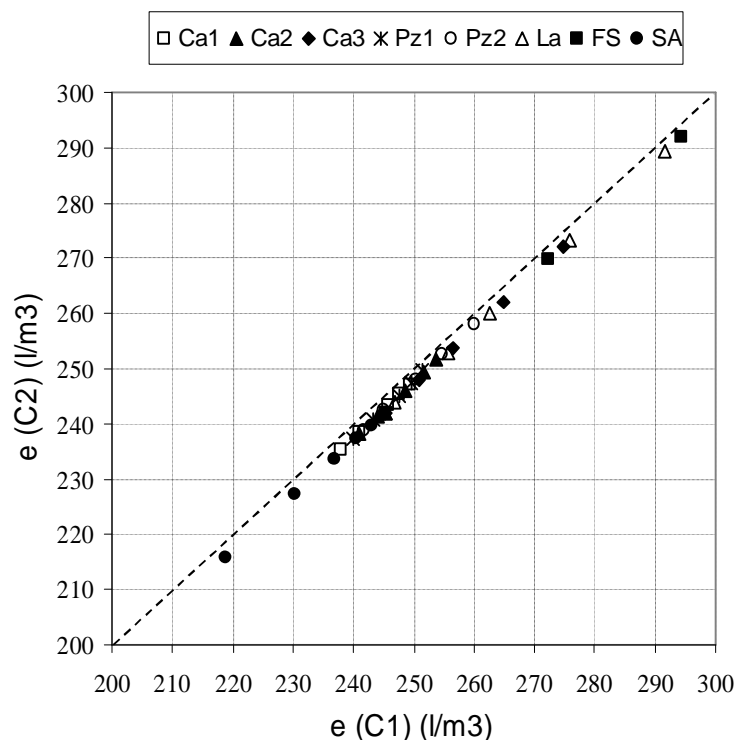


Figure III.5 : Corrélation entre les besoins en eau des mortiers C1 et C2 avec additions, à même consistance

Cet écart entre les besoins en eau des mortiers C1 et C2 peut être quantifié en analysant la variation du besoin en eau des mortiers C1 et C2, avec additions, notée $\Delta e(C1-C2)$, en fonction du taux de substitution du ciment (figure III.6). Nous remarquons que la variation du besoin en eau entre les mortiers de référence C1 et C2 est égale à 3.4 l/m^3 , correspondant à 1.4 % du besoin en eau du mortier C1. Cette variation qui est peu importante, confirme l'effet minime que peut engendrer la nature du ciment sur les besoins en eau des mortiers de référence.

La variation du besoin en eau des mortiers avec additions se situe entre 3.4 et 1.7 l/m^3 , et est d'autant plus faible que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la variation du besoin en eau des mortiers de références C1 et C2 qui dépend de la nature du ciment utilisé, commence à décroître avec la diminution dans le mélange, de la quantité de ciment aux dépens de la quantité d'addition qui tend à atténuer cette variation.

La variation $\Delta e(C1-C2)$ du mortier sans additions se situe entre 3 et 3.4 l/m^3 , c'est-à-dire dans une marge très limitée, ce qui suggère que l'augmentation de la quantité de sable dans les mélanges aux dépens de la quantité de ciment engendre peu de variations du comportement rhéologique des matériaux cimentaires dues à la nature du ciment.

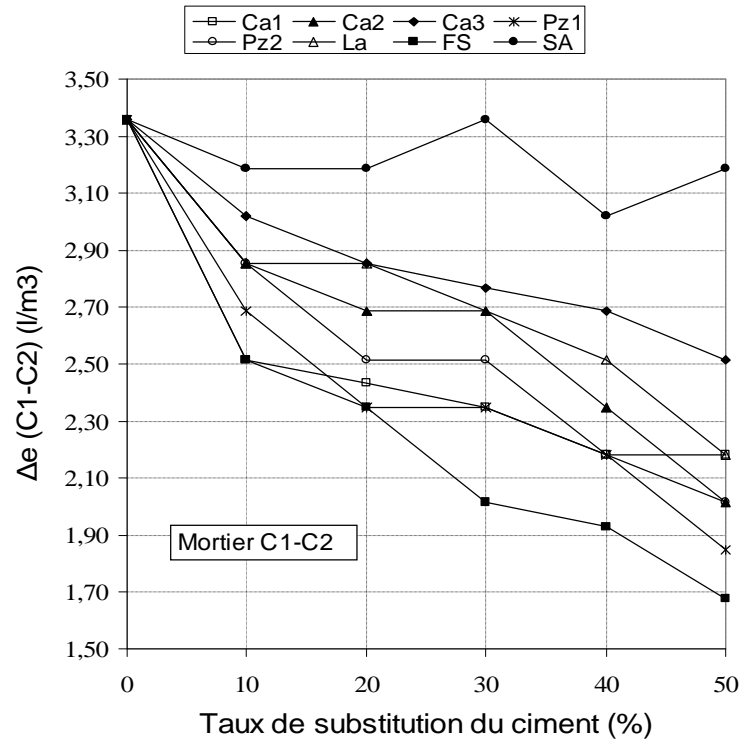


Figure III.6 : Variation des besoins en eau des mortiers C1 et C2 $\Delta e(C1-C2)$, à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

VI.2. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA COMPACTITE DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

La corrélation entre les compacités des mortiers C1 et C2 avec additions peut être représentée par la figure (III.7). Nous remarquons que tous les points expérimentaux des compacités des mortiers C1 et C2 avec additions, se placent à gauche de la bissectrice du côté de l'axe des compacités des mortiers C2 avec additions, et suivent une droite qui lui est presque parallèle. Ceci montre que les compacités des mortiers C2 avec additions à même consistance sont toujours plus fortes que celles des mortiers C1 avec additions.

L'écart entre les compacités des mortiers C1 et C2 peut être quantifié en analysant la variation de la compacité des mortiers C1 et C2 avec additions, notée $\Delta c(C1-C2)$, en fonction du taux de substitution du ciment (figure III.8). Nous remarquons que la variation de la compacité entre les mortiers de référence à base des ciments C1 et C2 est égale à -2.58 %, correspondant à 3.7 % de la compacité du mortier C1. La variation de la compacité des mortiers avec additions se situe dans un intervalle très réduit, entre -2.58 et -2.15 %, et est d'autant plus croissante que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand. Ce comportement varie d'une façon opposée à celui de la variation des besoins en eau et confirme la très bonne correspondance entre ces deux caractéristiques pour les mortiers avec additions en raison du maintien de la même consistance pour tous les mélanges frais.

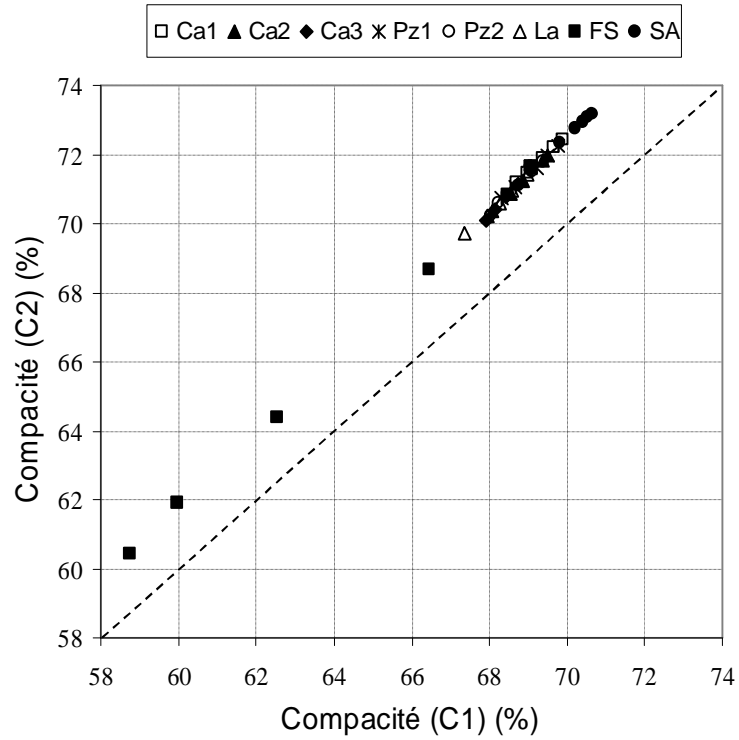


Figure III.7 : Corrélation entre les compacités des mortiers C1 et C2 avec additions, à même consistance

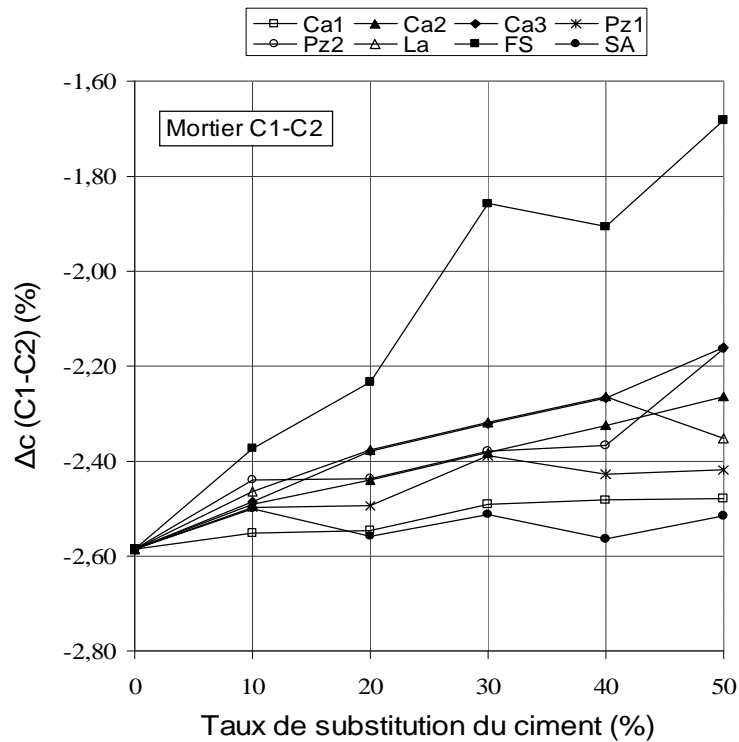


Figure III.8 : Variation des compacités des mortiers C1 et C2 $\Delta c(C1-C2)$, à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Pour les mortiers avec fumée de silice, la variation de la compacité entre les mortiers C1 et mortiers C2, se situe dans un champ plus large, entre -2.58 et -1.68 %, et est d'autant plus importante que le taux de substitution du ciment par ma fumée de silice est grand. Ce cas particulier est probablement dû à la finesse de l'addition incorporée, car la petite dimension des particules des additions les rend beaucoup plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide.

La variation de la compacité pour les mortiers sans additions se maintient autour de -2.58, sans être trop influencé par la nature et la quantité de ciment dans le mélange.

VI.3. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LE VOLUME D'AIR OCCLUS DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

La corrélation entre les volumes d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 avec additions peut être représentée par la figure (III.9). Nous remarquons que tous les points expérimentaux des volumes d'air occlus des mortiers C1 et C2 avec additions, se placent à droite de la bissectrice du côté de l'axe des volumes d'air occlus des mortiers C1 avec additions, et suivent une droite qui lui est presque parallèle. Ceci montre que les volumes d'air occlus dans les mortiers C1 avec additions à même consistance sont toujours plus importants que dans les mortiers C2.

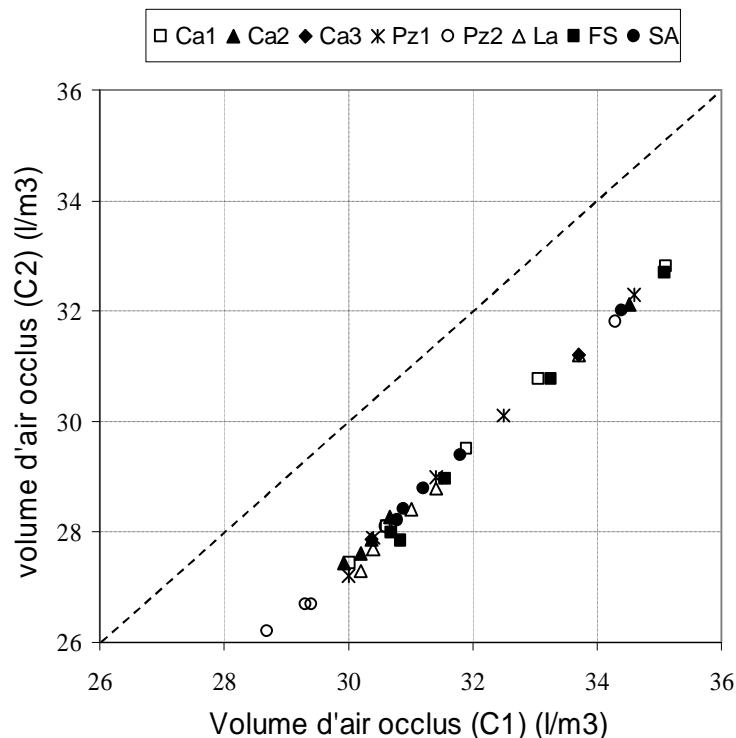


Figure III.9 : Corrélation entre les volumes d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 avec additions, à même consistance

L'écart entre les volumes d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 peut être quantifié en analysant la variation du volume d'air occlus dans les mortiers C1 et C2 avec additions, notée $\Delta v_a(C1-C2)$, en fonction du taux de substitution du ciment (figure III.10). Nous remarquons que la variation du volume d'air occlus des mortiers de référence C1 et C2 est égale à 2.2 l/m^3 , correspondant à 6 % du volume d'air occlus du mortier C1. La variation du volume d'air occlus entre les mortiers C1 et C2 avec additions minérales, se situe dans une marge réduite entre 2,2 et 3 l/m^3 , ce qui confirme l'influence minimale de la nature et de la quantité du ciment sur le volume d'air occlus des mortiers avec additions.

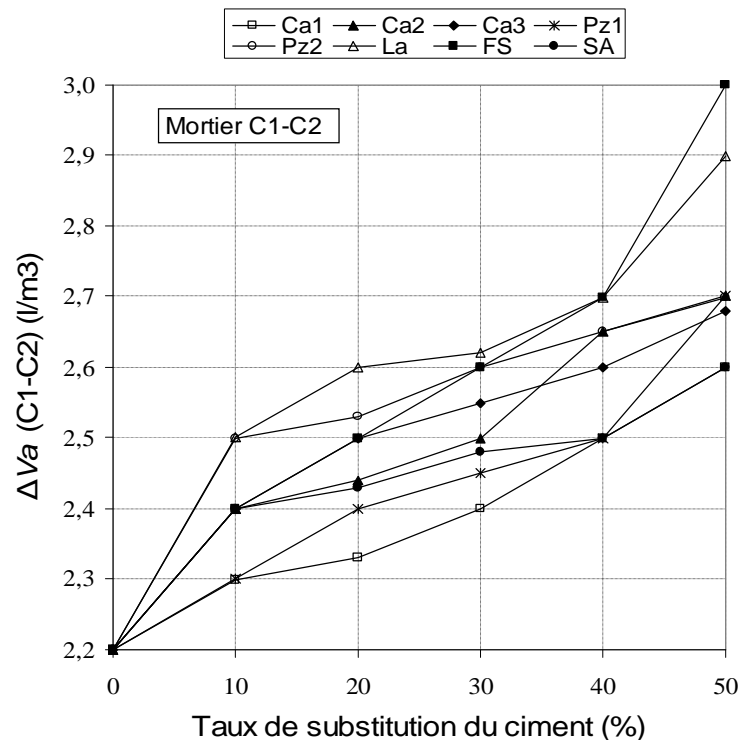


Figure III.10 : Variation des volumes d'air occlus des mortiers C1 et C2 $\Delta v_a(C1-C2)$, à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Il en résulte donc que les propriétés des mortiers avec additions à l'état frais sont peut influencées par la nature du ciment.

VII. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A L'ETAT FRAIS

L'influence de la finesse des additions minérales sur le besoin en eau et la compacité des mortiers à l'état frais a été étudiée pour les trois additions calcaires et les deux additions de pouzzolanes de finesse différentes en considérant la variation de ces propriétés en

fonction de la finesse Blaine en (cm^2/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition et pour les deux ciments utilisés.

VII.1. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS SUR LE BESOIN EN EAU DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

L'influence de la finesse des additions minérales sur le besoin en eau des mortiers avec additions peut être représentée par la figure (III.11).

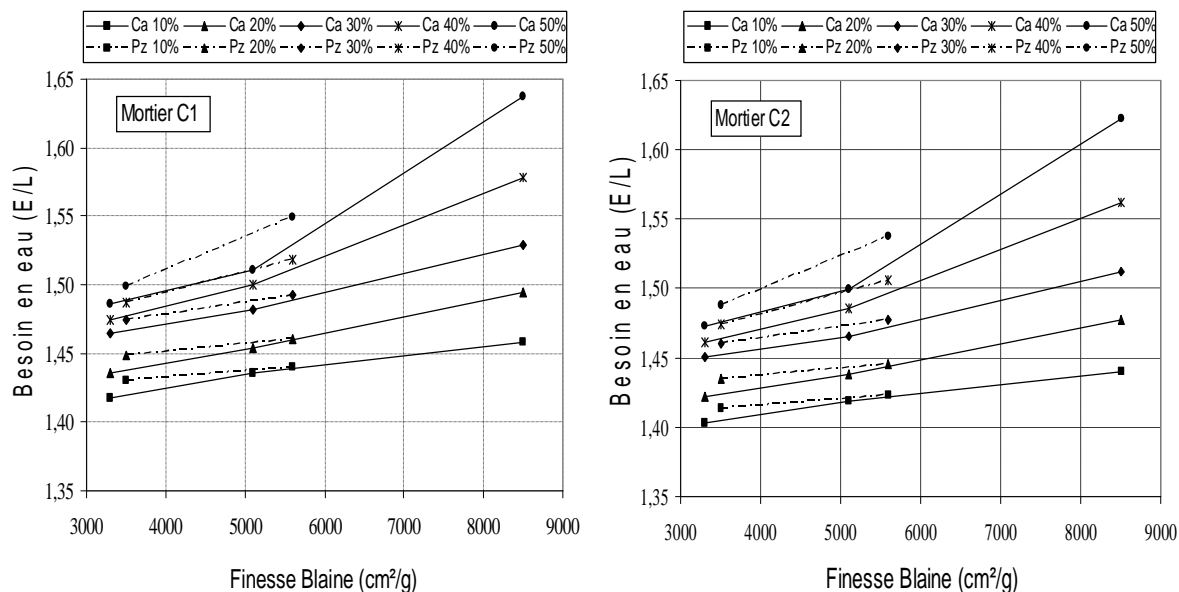


Figure III.11 : Variation du besoin en eau des mortiers C1 et mortiers C2 en fonction de la finesse des additions

Nous remarquons que le besoin en eau des mortiers avec additions est d'autant plus important que la finesse des particules d'additions est grande, quelque soit la nature du ciment et il est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand. Ceci peut être parfaitement expliqué par le fait que l'introduction des additions minérales de finesse plus importante que celle du ciment utilisé, entraîne une augmentation de la surface à lubrifier. Ceci engendre un besoin en eau plus important pour le matériau à même consistance qui est d'autant plus grand que la quantité de cette addition dans le mélange est importante.

D'autre part, il est à noter que le besoin en eau des mortiers C2 avec additions est toujours plus important que celui des mortiers C1 avec additions, pour toutes les finesesses des additions considérées.

Pour des finesesses proches, le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires quelque soit la

nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand et que la finesse de l'addition est importante.

VII.2. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS SUR LA COMPACTITE DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

L'influence de la finesse des additions minérales sur la compacité des mortiers avec additions à l'état frais peut être représentée par la figure (III.12). Nous remarquons que la compacité des mortiers avec additions est d'autant plus faible que la finesse des particules d'additions est grande quelque soit la nature du ciment et elle est d'autant plus faible que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand. Ce comportement suggère que l'introduction des additions minérales de finesse plus importante que le ciment utilisé atténue la compacité du matériau frais à même consistance ; ceci est d'autant plus vrai que le taux de cette addition dans le mélange est important.

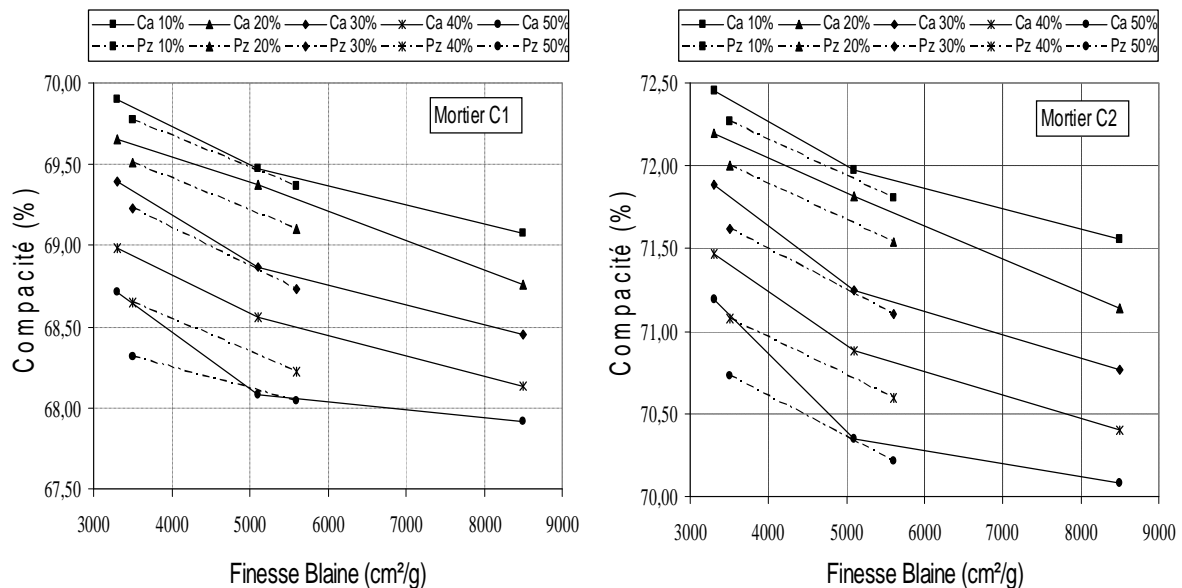


Figure III.12 : Variation de la compacité des mortiers C1 et mortiers C2 frais en fonction de la finesse Blaine des additions

D'autre part, il est à noter que la compacité des mortiers C2 avec additions est toujours plus importante que celle des mortiers C1 avec additions, pour toutes les finesesses des additions considérées. Ceci concorde parfaitement avec le besoin en eau qui est plus important pour les mortiers C1.

Pour des finesesses proches, la compacité des mélanges frais est plus importante pour les mortiers avec additions calcaires que pour les mortiers avec additions de pouzzolanes quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus

vrai que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand et que la finesse de l'addition est faible.

Nous pouvons donc déduire que le besoin en eau et la compacité des mortiers frais avec additions sont beaucoup influencés par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend de la nature et de la quantité d'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, mais reste indépendante de la nature du ciment utilisé. Pour les deux additions considérées, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation du besoin en eau et une diminution de la compacité des mortiers avec additions à l'état frais, quelque soit la nature du ciment. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment par l'addition est faible.

VIII. SYNTHÈSE

L'approche méthodologique utilisée pour cette étude consiste en premier lieu en la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mortiers dont le volume absolu de l'ensemble des phases solides constituantes demeure constant et l'ouvrabilité des mélanges est conservée par la correction de la quantité d'eau dans le mélange. Dans ce cas, la compacité de la structure granulaire et la porosité de la matrice cimentaire des mélanges avec additions demeurent comparables à celle du mélange sans additions qui constitue le mortier de référence et seuls les effets des particules d'additions sont pris en compte dans la phase cimentaire.

La composition des mortiers de références C1 et C2 sans additions a été inspirée de celle du mortier normal défini par la norme EN 196-1, avec une quantité d'eau ajustée afin d'obtenir une consistance de référence. Le mortier de référence C1 présente un besoin en eau plus important, des résistances en compression et à la traction à 07 jours plus importantes et des résistances en compression et à la traction à 28 jours moins importantes par rapport au mortier de référence C2.

La substitution du ciment par des additions minérales, volume par volume en préservant un volume absolu des composants solides constant, engendre une variation de l'ouvrabilité des mélanges frais. Le comportement des mortiers avec additions sur la table à secousses, dépend de la nature, de la quantité et de la finesse de l'addition incorporée dans le mélange.

Pour donner au mortier avec additions minérales la consistance de référence, la quantité d'eau dans les mélanges a été ajustée, ce qui a entraîné une variation du besoin en eau des mortiers à même consistance. Ce besoin en eau varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) de l'addition incorporée et le taux

de substitution du ciment par l'addition. Pour les faibles taux de substitution de ciment par les additions minérales fines, le besoin en eau des mortiers avec additions est directement liée aux phénomènes de l'empilement granulaire, et donc à la compacité des mélanges à l'état frais, alors que pour les mortiers avec additions ultrafines, la petite dimension des particules des additions les rend beaucoup plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide.

La compacité du squelette granulaire des mortiers à l'état frais a été déterminée pour vérifier directement la densité de l'empilement granulaire. Elle a été calculée à partir de leurs masses volumiques apparentes en tenant compte des masses volumiques absolues des constituants solides, et est exprimée en (%). La compacité de la structure granulaire pour les mortiers avec additions minérales est directement liée au besoin en eau et suit une variation opposée. L'optimisation observée du besoin en eau pour les faibles taux de substitution du ciment pour les additions calcaires et de pouzzolanes est expliquée par le relatif gain de compacité enregistré par les mortiers avec ces additions fines. La très bonne correspondance entre le besoin d'eau et la compacité dans les mortiers avec additions minérales est liée au fait que le serrage de la structure granulaire des mortiers lors de la mise en place dans les moules reste équivalent, indépendamment de la nature et des caractéristiques des additions minérales, et ce, en raison du maintien d'une même consistance pour tous les mélanges frais. Ceci a été confirmé par le volume d'air occlus dans les mortiers qui a été calculé à partir de la compacité du squelette granulaire et de la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires en supposant que les proportions des composants solides et liquides du mélange sont celles mises en œuvre lors du malaxage. Le volume d'air occlus dans tous les mortiers avec additions minérales était limité dans un domaine assez réduit, ce qui justifie la très bonne correspondance entre la variation du besoin en eau et la compacité des mortiers à l'état frais.

L'influence de la nature du ciment sur les propriétés des mortiers avec additions à l'état frais, a été étudiée en utilisant deux types de ciments pour tout le travail expérimental : le ciment C1 : CPJ-CEM II/A 42.5 et le ciment C2 : CPA-CEM I/A 42.5.

Le comportement des mortier avec additions à base du ciment C2 à l'état frais (Etalement, besoin en eau, compacité et volume d'air occlus), est similaire à celui du mortier avec additions à base du ciment C1, et par conséquent, les propriétés rhéologique des mortiers avec additions à l'état frais ne sont pas ou peu influencées par la nature du ciment utilisé. Cette similitude de comportement est probablement due au fait que les deux mortiers de référence présentent le même rapport volumique ciment/solide et la même consistance, c'est-à-dire que la structure du squelette granulaire et l'intensité des frictions entre les particules restent similaires.

L'influence de la finesse des additions minérales sur le besoin en eau et la compacité des mortiers à l'état frais a été étudiée en considérant trois additions calcaires et deux additions de pouzzolanes de finesses différentes en considérant la variation de ces propriétés dans les mortiers C1 et C2, en fonction de la finesse Blaine en (cm^2/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition. Le besoin en eau et la compacité des mortiers frais avec additions sont beaucoup influencés par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend de la quantité et de la nature de l'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, mais reste peu influencée par la nature du ciment utilisé. Pour les deux additions considérées, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation du besoin en eau et une diminution de la compacité des mortiers avec additions à l'état frais, quelque soit la nature du ciment. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment par l'addition est faible.

RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

I. INTRODUCTION

La substitution du ciment par les additions minérales volume par volume en préservant un volume absolu des composants solides constant, engendre une variation des résistances mécaniques des mortiers avec additions à 07 jours et 28 jours.

Pour chaque mortier ayant acquis la consistance de référence, en ajustant la quantité d'eau dans le mélange, des éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm ont été utilisées pour la caractérisation des résistances mécaniques des mortiers à 07 jours et 28 jours.

Afin d'étudier l'effet de la nature du ciment sur les résistances en compression des mortiers avec additions, le travail expérimental a été conduit en considérant deux types de ciments C1 (CPJ CEM II/A 42.5) et C2 (CPA CEM I/A 42.5), couramment utilisés à l'Est Algérien.

II. RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

Les variations des résistances en compression à 07 jours et 28 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (IV.1) et (IV.2).

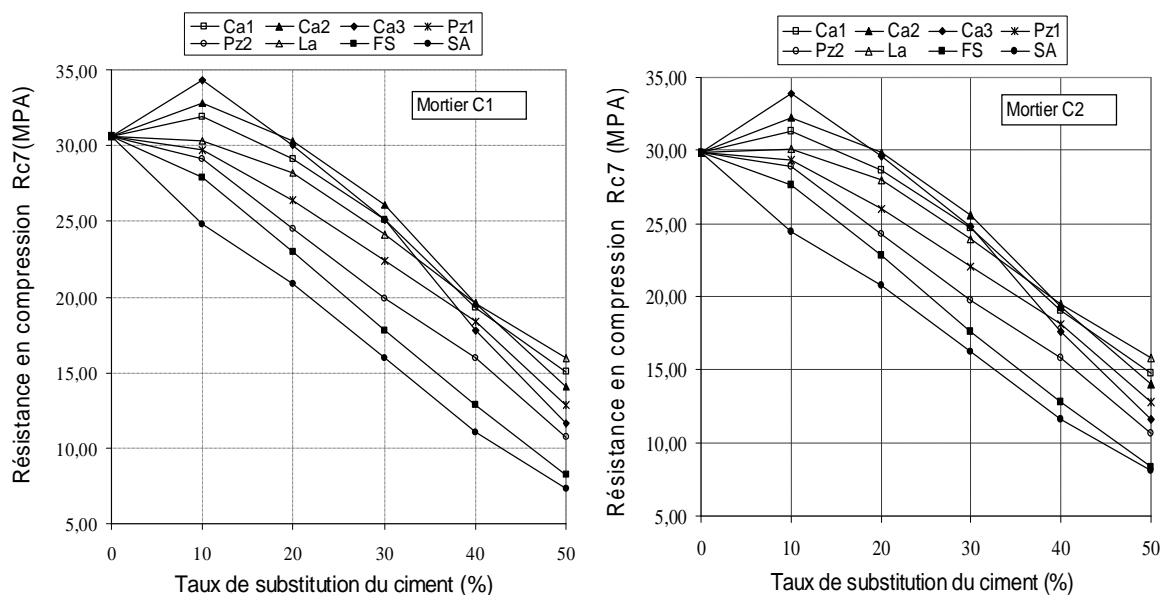


Figure IV.1 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

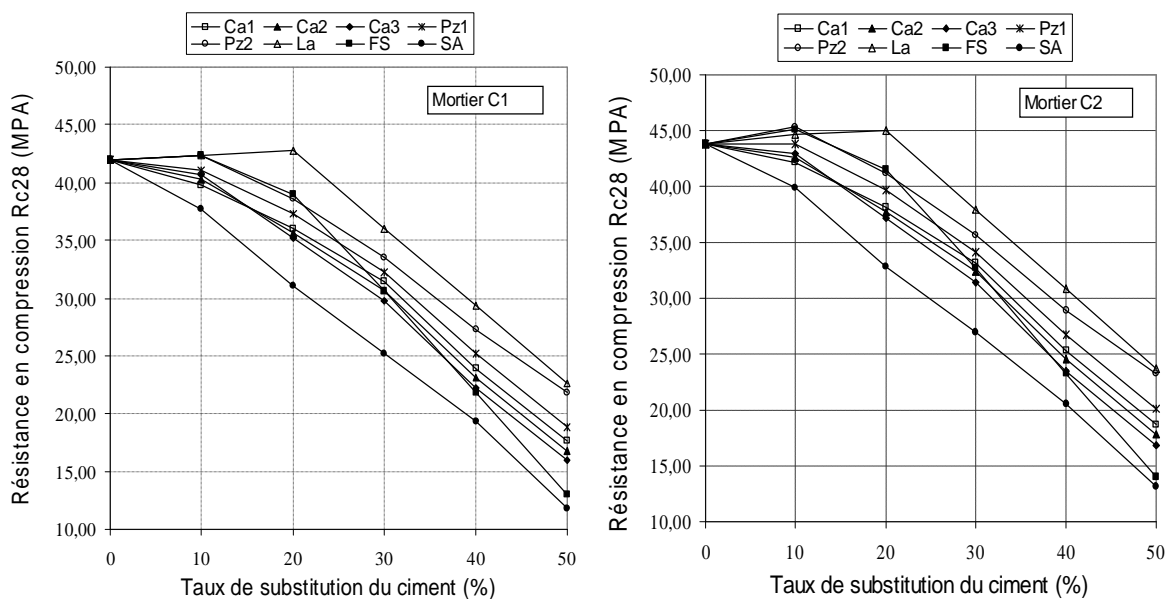


Figure IV.2 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

Nous remarquons que le mortier de référence C2 présente une résistance en compression à 07 jours plus faible que celle du mortier de C1 de près de 3 % ; par contre, sa résistance en compression à 28 jours est supérieure de 4.5 % par rapport à celle du mortier de référence C1. Ce comportement est probablement dû à la faible teneur en C_3A du ciment C2, car le C_3A a tendance à accélérer le processus d'hydratation du ciment et à favoriser les résistances à jeunes âges. Toutes fois la teneur supplémentaire en C_3A se fait aux dépens de la teneur en C_2S et C_3S , et de se fait pénalise les résistances à moyen et long terme.

Nous pouvons remarquer aussi, que le comportement des mortiers C1 et des mortiers C2 avec additions est similaire. Les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers avec additions minérales varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité d'addition incorporée dans le mélange.

Afin de mieux analyser l'influence des additions minérales sur les résistances en compression des mortiers, nous avons ramené la résistance en compression des mortiers avec additions à la résistance relative, noté (R_{ci}/R_{c1i}) , en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %).

La variation des résistances relatives en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (IV.3) et (IV.4).

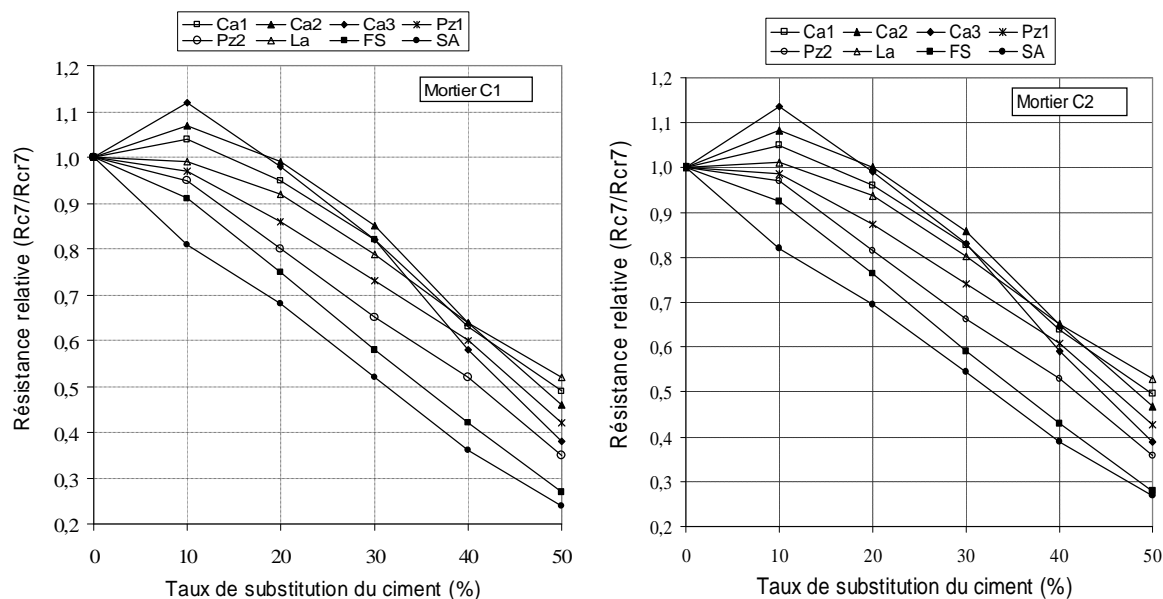


Figure IV.3 : Variation des résistances relatives en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l’addition

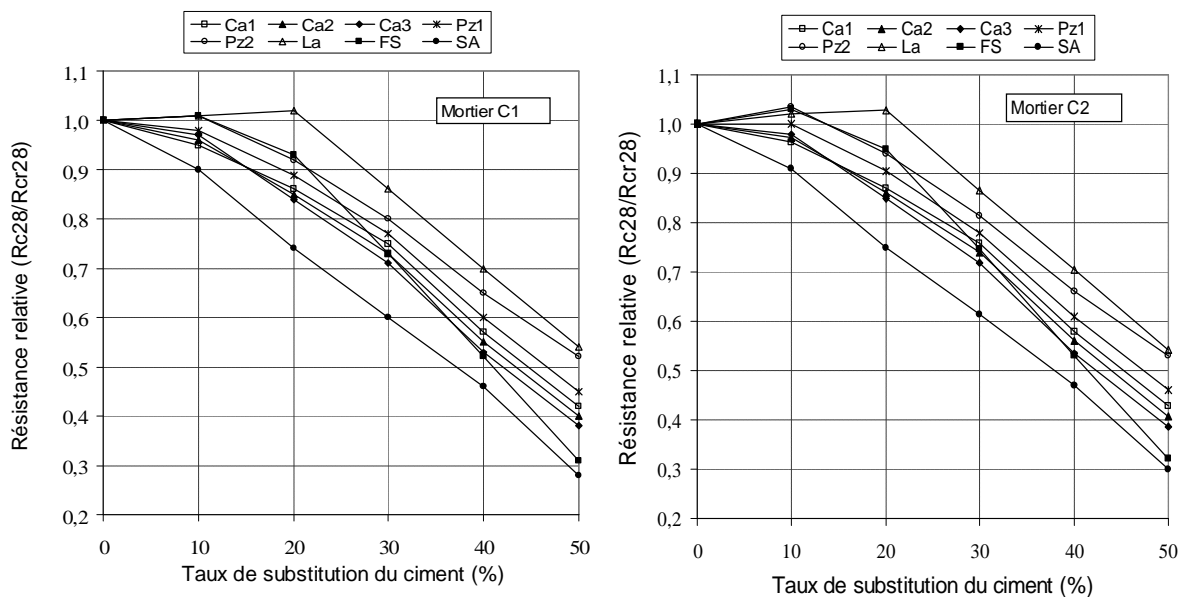


Figure IV.4 : Variation des résistances relatives en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l’addition

Nous remarquons sur les figures (IV.3) et (IV.4), que pour les mortiers C1 avec additions calcaires (Ca1, Ca2, et Ca3), les résistances en compression à 07 jours croissent pour les faibles taux de substitution du ciment et atteignent un maximum au voisinage de 10 %, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l’addition, avec une intensité plus importante pour les mortiers avec additions (Ca3) de finesse plus importante et de besoin en eau de plus en plus croissant. Pour les mortiers C1

avec additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2), de laitier granulé de hauts fourneaux (La) et de fumée de silice (FS), les résistances en compression à 07 jours diminuent directement sans aucune inflexion favorable enregistrée. Cette décroissance est proportionnelle aux taux de substitution du ciment par l'addition et elle est plus accentuée pour les mortiers avec fumée de silice dont la résistance tend vers celle du mortier sans additions en raison des forts besoins en eau utilisés pour conférer à ces mortiers la consistance de référence. La décroissance des résistances pour les mortiers avec additions (La) à 07 jours est la moins accentuée malgré que leur besoin en eau est plus fort que les mortiers avec additions (Pz1 et Pz2). Ces derniers présentent un comportement intermédiaire entre les mortiers avec additions (La) et les mortiers avec additions (FS).

L'amélioration des résistances relatives en compression à 07 jours pour les additions calcaires (figure IV.3), qui atteint 4, 7 et 12 % pour les mortiers avec additions (Ca1), (Ca2) et (Ca3), respectivement ne se reproduit pas pour les résistances en compression à 28 jours. Ces dernières diminuent directement sans aucune amélioration et descendent au dessous de 90 % de la résistance du mortier de référence à partir de 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les mortiers avec additions de pouzzolanes, les résistances en compression affichent une amélioration minimale pour les mortiers avec additions (Pz2) à 10 % du taux de substitution du ciment, mais décroissent dans les autres cas. Pour les mortiers avec additions de laitier et de fumée de silice, la résistance relative présente une légère évolution de 2 % à 20 % du taux de substitution du ciment pour le premier et 1 % à 10 % du taux de substitution du ciment pour le second.

Le comportement des mortiers C2 avec additions calcaires (Ca1, Ca2, et Ca3), est similaire à celui des mortiers C1, mais les résistances en compression à 07 jours atteignent au voisinage de 10 % des taux légèrement plus forts de 5, 8 et 13 % pour les mortiers avec additions (Ca1), (Ca2) et (Ca3), respectivement. Les mortiers C2 avec additions de laitier, présentent une amélioration relative de 1% de la résistance en compression à 07 jours, au voisinage de 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît de la même manière que pour les mortiers C1. A 28 jours, l'amélioration de la résistance en compression du mortier avec addition (La), atteint 4 %, à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les mortiers avec fumée de silice, les résistances en compression à 07 jours décroissent de la même manière que pour les mortiers C1, mais la résistance en compression à 28 jours, présente une amélioration relative de 3 % à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis commence à décroître de la même manière que pour les mortiers C1. Les mortiers avec additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2), présentent un comportement intermédiaire entre les mortiers avec additions (La) et les mortiers avec additions (FS). Les résistances en compression à 07 jours diminuent directement sans aucune amélioration, mais la chute de résistance est moins accentuée que pour les mortiers

C1. La résistance en compression à 28 jours, affiche une amélioration relative de 4 % pour les mortiers avec additions (Pz2) et un maintien de la résistance avec les additions (Pz1) à 10 % du taux de substitution du ciment, puis décroît et descend au dessous de 90 % de la résistance du mortier de référence à partir de 20 % du taux de substitution du ciment.

Nous pouvons donc déduire que l'action des additions calcaires sur le ciment est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges, à faible taux de substitution du ciment par l'addition. Cette accélération est peu influencée par la nature du ciment et elle est plus ou moins équivalente pour toutes ces additions, en étant plus prononcée pour les additions de grande finesse.

L'action des additions de pouzzolanes est assez limitée dans le cas des mortiers C1, en raison de l'utilisation d'un ciment composé CEM II/A avec probablement un ajout de pouzzolane, mais les résistances en compression se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 07 jours d'âge, à cause de l'effet pouzzolanique qui commence à se déclarer tardivement.

La présence des additions de laitier granulé des hauts fourneaux dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment (<20 %) limite la chute de la résistance en compression à 07 jours et procure un gain minime de résistance à 28 jours, en raison de leurs propriétés hydrauliques latentes qui sont tout de même atténuées par l'augmentation relative du besoin en eau des mortiers avec additions (La) à même consistance.

L'action de la fumée de silice sur les mortiers se caractérise par une chute des résistances en compression à 07 jours et un léger gain à 28 jours. Ce comportement, a été expliqué par Lilkov & al [26], qui ont montré que les grains ultrafins de la fumée de silice pénètrent entre les hydrates du ciment et les empêchent de se développer aux cours des premières étapes de l'hydratation. Par contre, le développement de l'action pouzzolanique de la fumée de silice permet d'améliorer significativement la résistance par rapport au mortier sans additions, malgré que son effet sur le ciment se trouve atténué par les besoins en eau importants nécessaires pour le maintien de la consistance de référence. L'ampleur de l'action pouzzolanique de la fumée de silice devient encore plus accentuée à long terme.

La contribution des additions minérales à l'amélioration des résistances en compression à 07 jours ou 28 jours en fonction de la nature, la quantité et la finesse des additions, est confirmée par plusieurs auteurs. En effet. Appa Rao [38] a montré que pour un rapport eau/liant constant égal à 0.5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier jusqu'à 30 % de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier. Kwan [21] a également montré que quelque soit le rapport eau/liant, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier jusqu'à 15 % de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression à 28 jours. Demirboga [39] a montré que l'incorporation de 10 % de fumée de silice, engendrait une amélioration de la résistance en compression à 7, 28 et 120 jours,

alors que les cendres volantes engendraient une diminution de la résistance en compression à tout âge et pour toutes les quantités. Le laitier granulé de hauts fourneaux engendrait une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours. Lawrence et al [9] ont également montré que pour des finesses proches du ciment, et à 07 jours, les mortiers contenant des additions calcaires présentaient des résistances en compression supérieures à celles des mortiers avec additions de quartz, mais cette différence devenait négligeable à 28 jours pour un taux de substitution du ciment donné. Belhachemi [55] a montré que l'augmentation de la finesse de l'ajout pouzzolanique dans le ciment engendrait une augmentation de la résistance en compression à 2, 7 et 28 jours, jusqu'à une valeur optimale de la finesse qui est de l'ordre de 4800 cm²/g, pour laquelle la résistance commence à diminuer en raison de la destruction de silicates bi-calciques et tricalciques. Aichouba et al [56] ont montré que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10 à 30 % engendrait une diminution des résistances mécaniques à jeunes âges et une conservation de ces résistances à long terme. D'autre part, Kara Ai [6], et Bessa [7], en étudiant des additions minérales de diverses natures, ont confirmé l'action favorable des additions calcaires sur les résistances en compression à jeunes âges mais qui disparaissait à 28 jours ainsi que l'action favorable de la fumée de silice sur les résistances en compression à 28 jours.

La contribution des additions minérales à l'amélioration des résistances en compression à 07 jours et 28 jours a été expliquée par plusieurs auteurs [1-12], comme étant la combinaison de trois effets principaux des additions sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état durci

- Un effet granulaire résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.
- Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.
- un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

III. RESISTANCES A LA TRACTION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

Les variations des résistances à la traction à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (IV.5) et (IV.6).

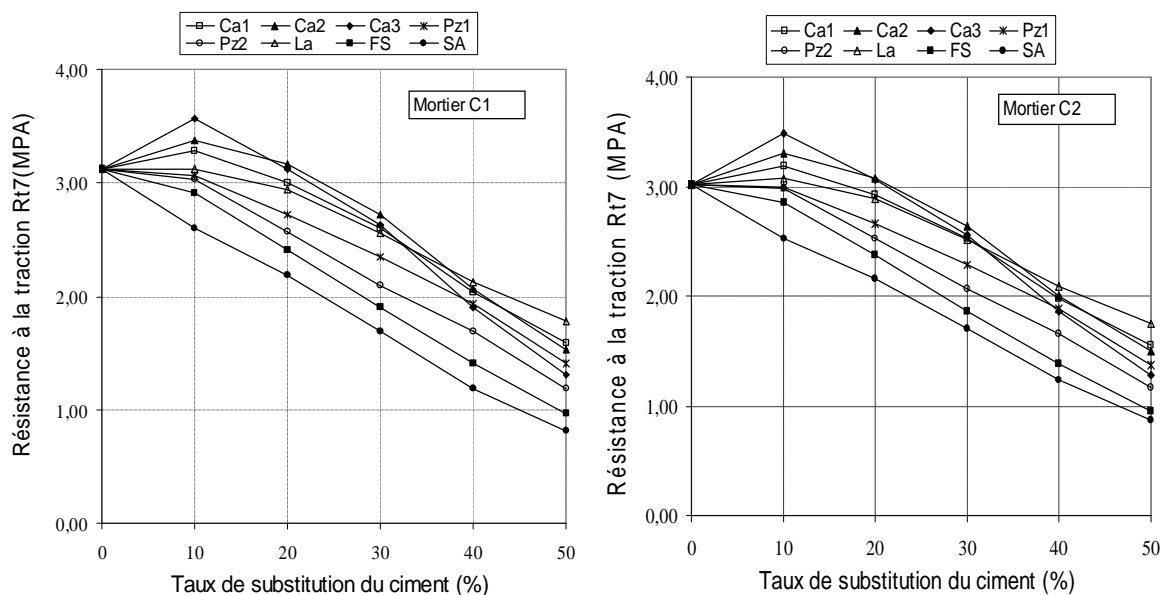


Figure IV.5 : Variation des résistances à la traction à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

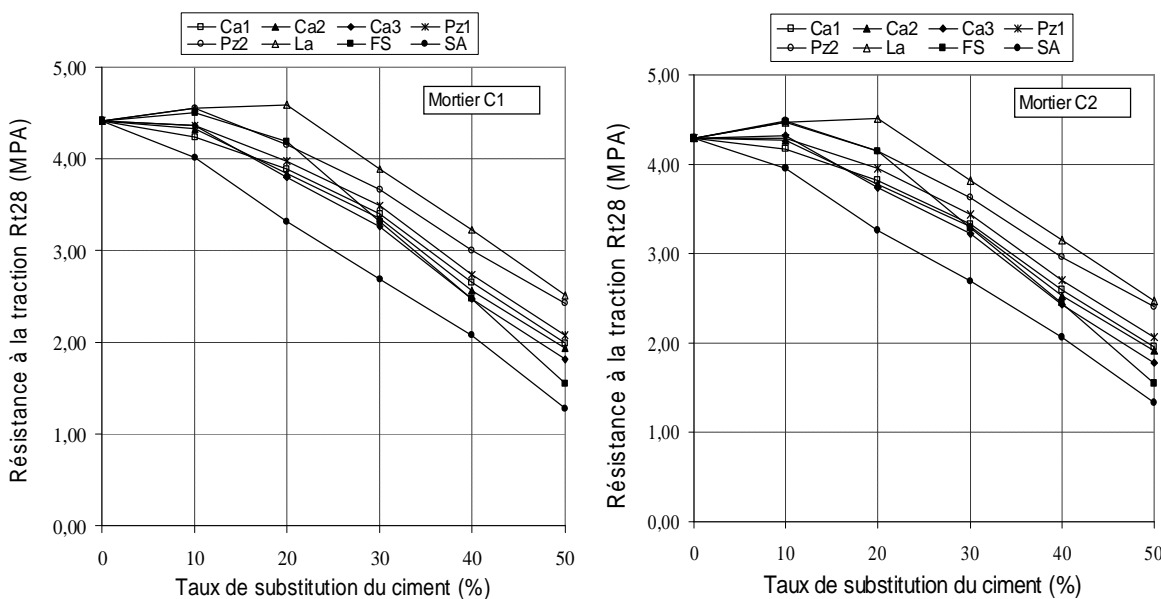


Figure IV.6 : Variation des résistances à la traction à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

Nous remarquons que le mortier de référence C2 présente une résistance à la traction à 07 jours plus faible que celle du mortier de référence C1 de près de 4 % ; par contre, sa résistance à la traction à 28 jours est supérieure de près de 3 % par rapport à celle du mortier de référence C1. Ce comportement est similaire aux résistances en compression et est probablement dû à la faible teneur en C₃A du ciment C2. Nous pouvons remarquer aussi, que les résistances à la traction à 07 jours et 28 jours des mortiers avec

additions minérales varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité d'addition incorporée dans le mélange.

L'influence des additions minérales sur les résistances à la traction des mortiers, peut être analysée par rapport aux résistances relatives à la traction, noté (R_{tj}/R_{trj}), en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %), avec :

R_{tj} : résistance à la traction au jour j du mortier avec addition minérale.

R_{trj} : résistance à la traction au jour j du mortier de référence.

La variation des résistances relatives à la traction à 07 jours et 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec additions est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (IV.7) et (IV.8). Nous remarquons que les résistances relatives à la traction à 07 jours et 28 jours présentent un comportement similaire aux résistances en compression pour les deux ciments utilisés.

A 07 jours, l'amélioration relative des résistances à la traction pour les additions calcaires (Ca1, Ca2, et Ca3), atteint un maximum de 14 % et 16 % pour l'addition (Ca3), dans les mortiers C1 et C2, respectivement, au voisinage de 10 % du taux de substitution du ciment. Pour les additions de laitier, la résistance à la traction se maintient pour le mortier C1, jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, puis décroît, alors qu'elle affiche une amélioration minimale de 2 % pour le mortier C2 au voisinage de 10 % du taux de substitution du ciment, avant de décroître. Pour les autres additions, la résistance à la traction à 07 jours décroît directement sans aucune amélioration.

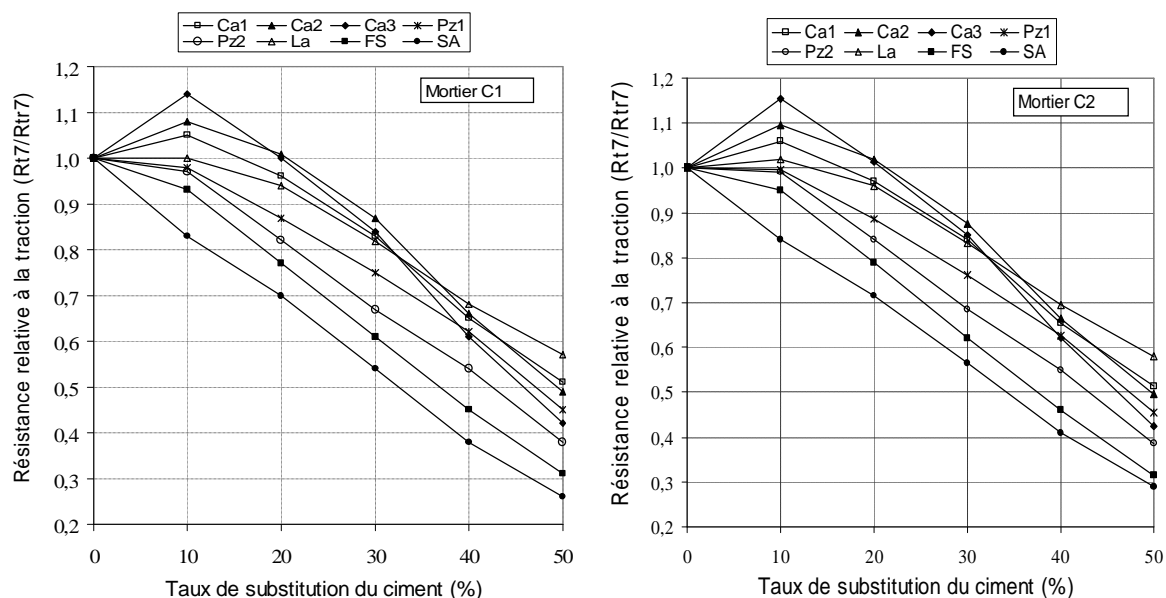


Figure IV.7: Variation de la résistance relative à la traction à 7 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

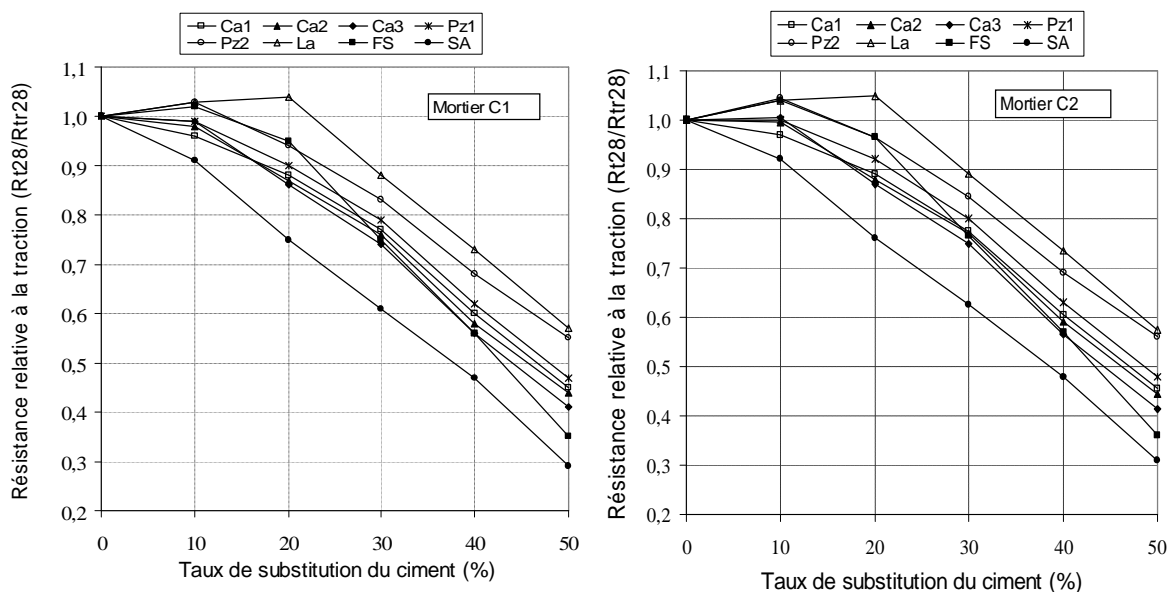


Figure IV.8 : Variation de la résistance relative à la traction à 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

A 28 jours la résistance à la traction des additions calcaires décroît directement sans aucune amélioration. Pour les mortiers avec additions de pouzzolanes, la résistance relative affiche une amélioration relative de 3 % et 5 % pour les mortiers C1 et C2, respectivement à 10 % du taux de substitution du ciment, mais décroît dans les autres cas. Pour les mortiers avec additions de laitier, la résistance relative présente une amélioration relative de 4 % et 5 % pour les mortiers C1 et C2, respectivement à 20 % du taux de substitution du ciment. Pour les mortiers avec fumée de silice, l'amélioration relative est de 2 % et 4 % pour les mortiers C1 et C2, respectivement à 10 % du taux de substitution du ciment.

La relation entre les résistances en compression et les résistances à la traction des mortiers avec additions à 07 jours et 28 jours peut être étudiée en analysant la corrélation de ces résistances pour les deux ciments utilisés (figures IV.9 et IV.10). Nous remarquons sur la figure (IV.9), qu'il existe une forte corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 07 jours. Tous les points expérimentaux des résistances suivent une droite parallèle à la bissectrice d'équation $R_{c7} = 10.R_{t7}$, du côté de l'axe des résistances à la traction à 07 jours. Ceci suggère, que les résistances à la traction à 07 jours tournent autour du dixième des résistances en compression, en valeur inférieure pour les deux ciments utilisés. Toute fois les résistances à la traction à 07 jours des mortiers C2 avec additions sont plus proches du dixième des résistances en compression que celles des mortiers C1 avec additions.

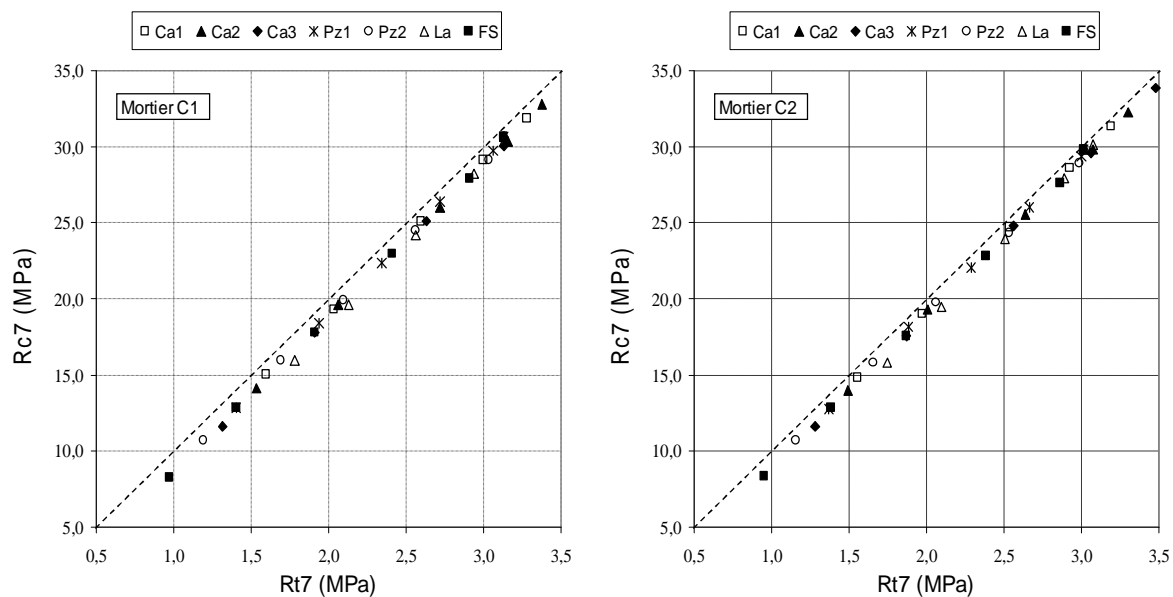


Figure IV.9 : Corrélation des résistances en compression et des résistances à la traction à 07 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions

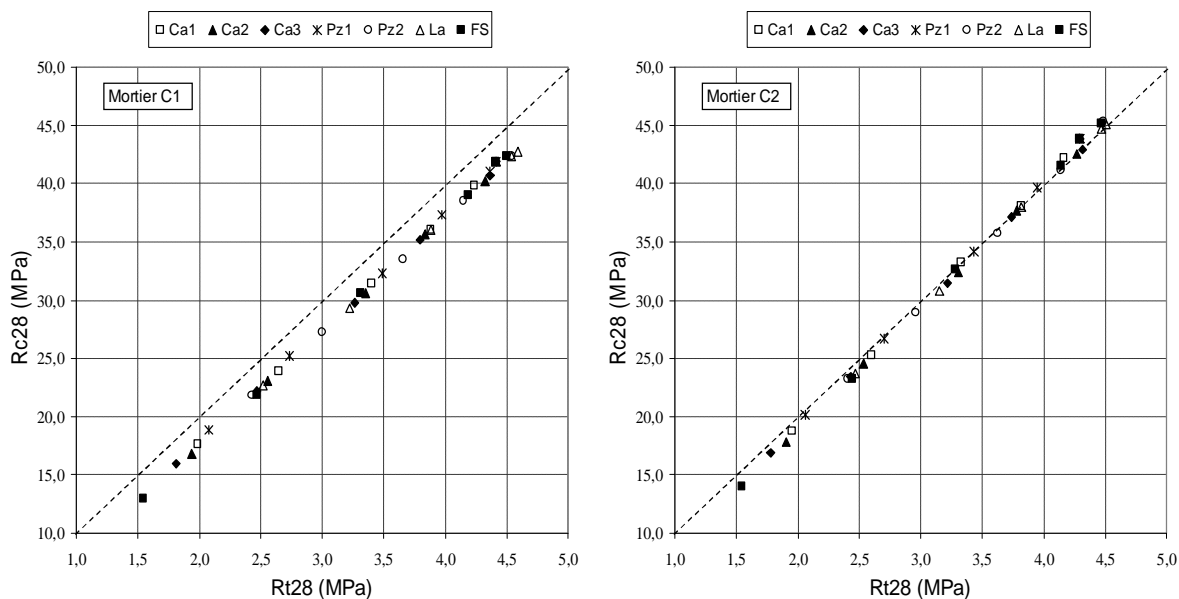


Figure IV.10 : Corrélation des résistances en compression et des résistances à la traction à 28 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions

De même, la figure (IV.10), montre qu'il existe une forte corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 28 jours. Tous les points expérimentaux des résistances des mortiers C1 avec additions suivent une droite parallèle à la bissectrice d'équation $R_{c28} = 10.R_{t28}$, du côté de l'axe des résistances à la traction à 28 jours. Ceci suggère, que les résistances à la traction à 28 jours des mortiers C1 avec additions tournent autour du dixième des résistances en compression, en valeur inférieure

pour les deux ciments utilisés. Les points expérimentaux des résistances des mortiers C2 avec additions suivent une droite tangente à la bissectrice d'équation $R_{c28} = 10.R_{t28}$. Ceci suggère, que les résistances à la traction à 28 jours des mortiers C2 avec additions tournent autour du dixième des résistances en compression.

Nous pouvons donc confirmer qu'il existe une très bonne corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction des mortiers C1 et C2 avec additions. De ce fait, les phénomènes à l'origine de la variation des résistances à la traction à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, sont les mêmes que ceux qui ont été exposés pour les résistances en compression.

IV. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

La corrélation des résistances en compression des mortiers C1 et des mortiers C2 avec additions à 07 jours et 28 jours (figure IV.11), permet de constater que les points expérimentaux des résistances en compression à 07 jours, sont tangents à la bissectrice du côté de l'axe des résistances des mortiers C1. Ceci confirme que les résistances en compression des mortiers avec additions à 07 jours sont proches pour les deux ciments, en étant globalement légèrement plus importantes pour les mortiers C1. L'écart par rapport à la bissectrice étant plus visible pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions, mais tend à disparaître pour les forts taux de substitution.

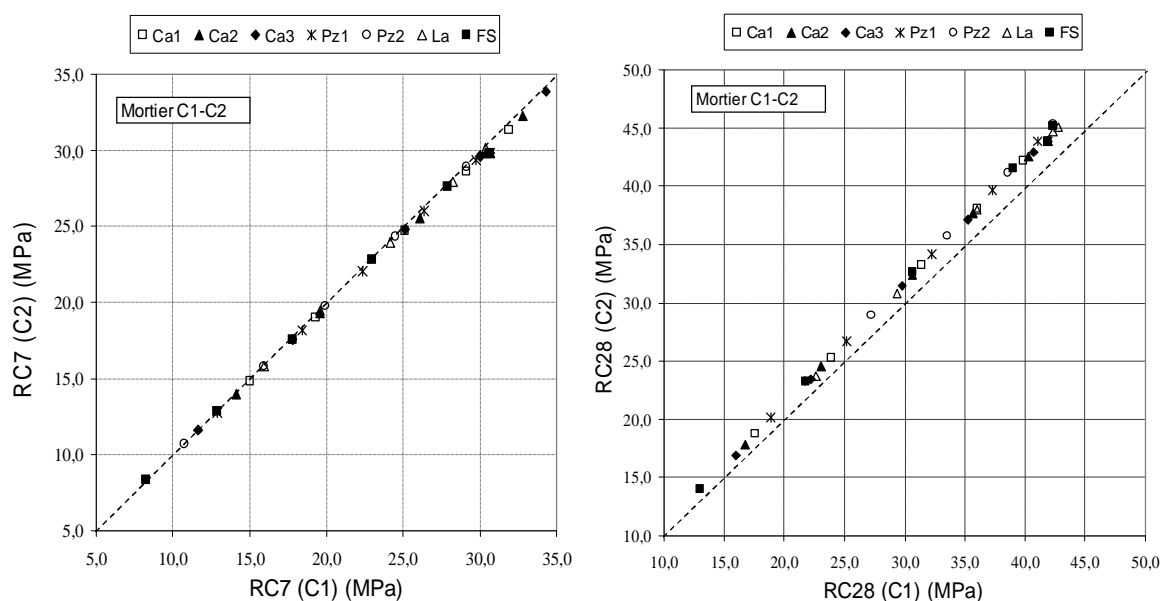


Figure IV.11 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 et 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

Les points expérimentaux des résistances en compression à 28 jours se placent tous à gauche de la bissectrice, du côté de l'axe des résistances des mortiers C2. Ceci confirme que les résistances en compression des mortiers avec additions à 28 jours sont globalement plus importantes pour les mortiers C2 avec additions ; l'écart par rapport à la bissectrice est plus important pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions, mais tend à se réduire pour les forts taux de substitution.

L'écart entre les résistances en compression des mortiers C1 et C2 avec additions peut être quantifié en analysant la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours entre les mortiers C1 et C2 avec additions, notées $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ et $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, respectivement, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition (figure IV.12).

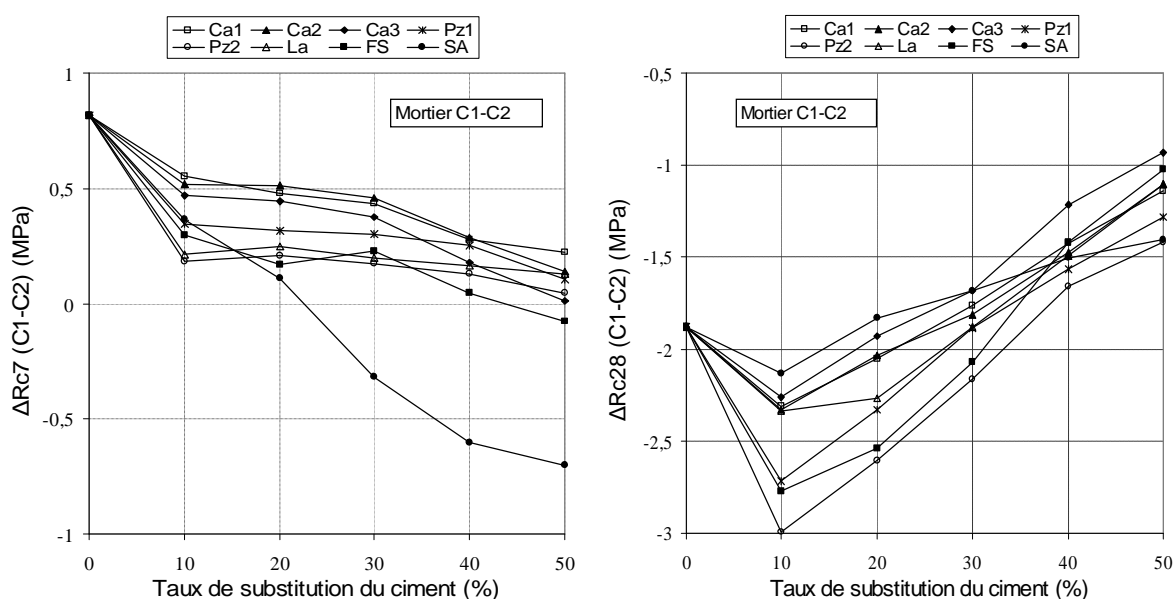


Figure IV.12 : Variation des résistances en compression $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ et $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, des mortiers C1 et C2 en fonction du taux de substitution du ciment

Nous pouvons confirmer par la figure (IV.12), que les mortiers C2 avec additions présentent globalement des résistances en compression légèrement plus faibles que les mortiers C1 avec additions, à 07 jours mais plus importantes à 28 jours. En général, la variation $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ est d'autant plus faible que le taux de substitution du ciment par l'addition est important. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers de références C1 et C2 qui est de 0.8 MPa, dépend de la nature du ciment utilisé. Au fur et à mesure de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition, la quantité du ciment dans le mélange qui est différente pour les deux mortiers, diminue au dépens de la quantité d'addition considérée qui est commune aux deux mortiers et qui tend à atténuer cette variation.

Pour les résistances en compression à 28 jours, au-delà de 10 % du taux de substitution du ciment, la variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$ est en général d'autant plus faible en valeur absolue que le taux de substitution du ciment par l'addition est important. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers de références C1 et C2 qui est de 1.9 MPa en valeur absolue, dépend de la nature du ciment utilisé. Cette variation est atténuée au fur et à mesure de la diminution de la quantité du ciment dans le mélange aux dépens de la quantité d'addition considérée. L'augmentation de la variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$ en valeur absolue pour les mortiers avec 10 % d'additions peut être sûrement expliqué par un comportement du couple ciment-addition très sensible à la nature de l'addition et ses caractéristiques granulaires.

Les variations $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ des mortiers avec additions se situent entre 0.8 et -0.1 MPa, c'est-à-dire dans une marge limitée. Ceci suggère que les résistances en compression des mortiers avec additions à 07 jours sont peu influencées par la nature du ciment. Les variations $\Delta R_{C28}(C1-C2)$ des mortiers avec additions se situent entre -3.0 et -0.9 MPa, c'est-à-dire dans une marge un peu plus large. Ceci suggère que les résistances en compression des mortiers avec additions à 28 jours sont légèrement influencées par la nature du ciment. Néanmoins, cette influence tend à s'atténuer avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange.

V. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES RÉSISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

L'influence de la finesse des additions minérales sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers avec additions a été étudiée en considérant trois additions calcaires et deux additions de pouzzolanes de finesses différentes, en analysant la variation de ces résistances en fonction de la finesse Blaine en (cm^2/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition et pour les deux ciments utilisés. Nous remarquons sur la figure (IV.13) que le comportement des résistances en compression à 07 jours en fonction de la finesse Blaine des additions, est similaire pour les deux mortiers C1 et C2 avec additions, et la variation de la résistance est fortement influencée par la finesse et la quantité de l'addition dans le mélange. Pour les additions calcaires, la résistance en compression à 07 jours des mortiers avec additions est d'autant plus importante que la finesse des particules est grande pour 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, mais elle est d'autant plus faible que la finesse des particules est grande pour 50 % du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux ciments utilisés. Pour les taux de substitution intermédiaires, la résistance en compression à 07 jours croît jusqu'à une finesse de 5100 cm^2/g , puis décroît pour les finesses plus importantes. Pour les additions de

pouzzolane, la variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers avec additions est plus régulière, elle est d'autant plus faible que la finesse des particules est grande pour tous les taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux ciments utilisés.

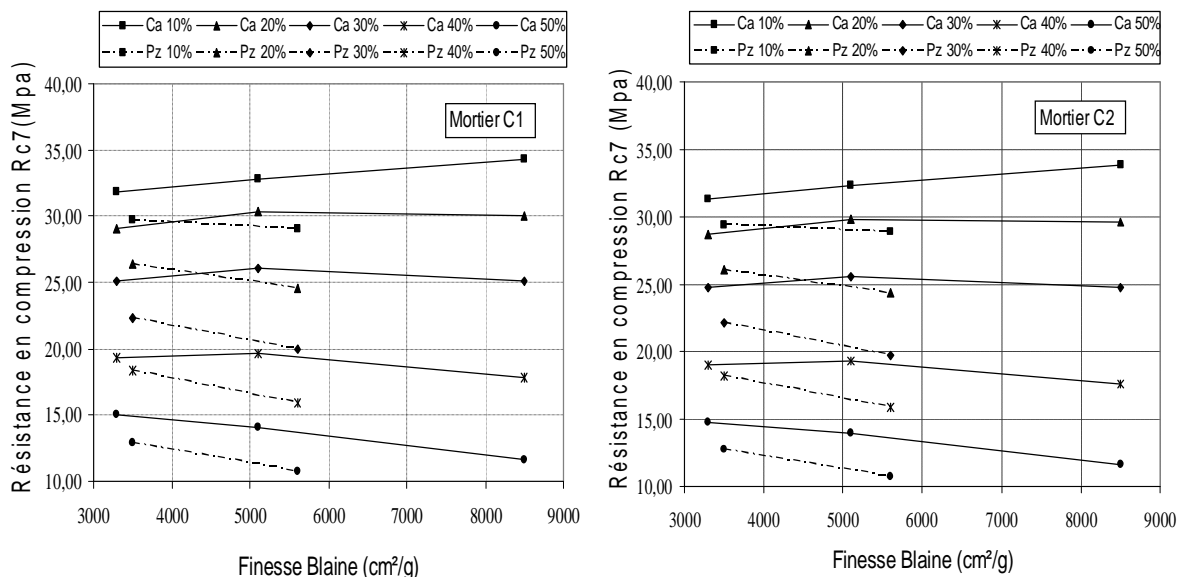


Figure IV.13 : Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction de la finesse Blaine

Le comportement particulier des mortiers avec additions calcaires est sûrement dû à l'influence des différents effets physiques et chimiques des additions sur les résistances en compression et à la sensibilité du processus d'hydratation du ciment à jeunes âges aux additions calcaires, à leurs proportions dans le couple ciment-addition et à leurs finesesses. Le comportement des mortiers avec additions de pouzzolanes est sûrement dû à un effet granulaire défavorable qui s'accroît avec la finesse de l'addition.

Pour des finesesses proches, la résistance en compression à 07 jours est plus importante pour les mortiers avec additions calcaires que pour les mortiers avec additions de pouzzolanes, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la finesse de l'addition est grande. Ceci confirme le rôle des additions calcaires dans l'accélération du processus d'hydratation du ciment à jeunes âges qui est d'autant plus important que la finesse de l'addition est grande.

La figure (IV.14) montre que le comportement des résistances en compression à 28 jours en fonction de la finesse Blaine des additions, est similaire pour les deux mortiers C1 et C2 avec additions, et la variation de la résistance est influencée par la finesse et la quantité de l'addition dans le mélange.

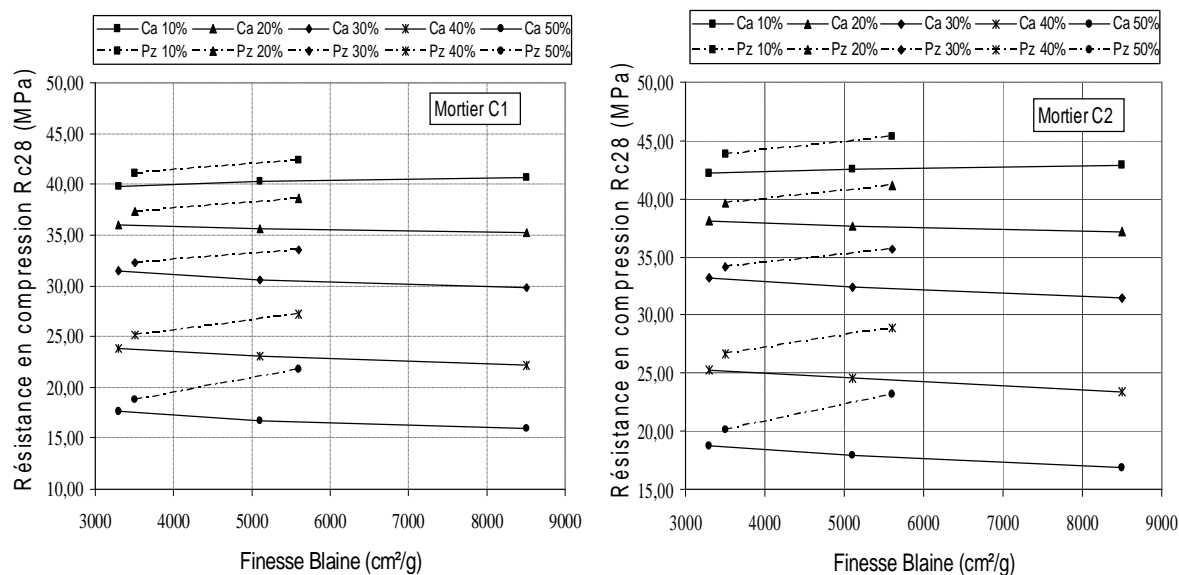


Figure IV.14 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction de la finesse Blaine

Pour les additions calcaires, la résistance en compression à 28 jours des mortiers avec additions est pratiquement constante à faibles taux de substitution du ciment par l'addition quelque soit la finesse des particules, mais décroît légèrement avec l'augmentation de la finesse pour les forts taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés. Pour les additions de pouzzolanes, la variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers avec additions est plus régulière, elle est d'autant plus importante que la finesse des particules est grande pour tous les taux de substitution du ciment par l'addition. Ceci est d'autant plus vrai que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand.

Le comportement des mortiers avec additions calcaires est sûrement dû à la disparition de l'effet chimique enregistré à jeunes âges et au maintien uniquement d'un effet granulaire favorable à faible incidence à faibles taux de substitution du ciment. Le comportement des mortiers avec additions de pouzzolanes est sûrement dû à la meilleure déclaration de l'effet pouzzolanique de ces additions pour les finesses les plus élevées, qui arrive à compenser l'effet granulaire défavorable.

Pour des finesses proches, la résistance en compression à 28 jours est plus importante pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la finesse de l'addition est grande et que le taux de substitution du ciment par l'addition est important. Ceci confirme la disparition de l'effet chimique des additions calcaires à 28 jours et la déclaration de l'effet pouzzolanique des additions de pouzzolanes qui est d'autant plus important que la finesse est grande.

Nous pouvons donc déduire que la finesse des particules d'addition influe sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours. Cette influence dépend beaucoup de la quantité et de la nature de l'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une diminution des résistances en compression à 07 jours et une augmentation des résistances en compression à 28 jours, quelque soit la nature du ciment. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est grand. Pour les additions calcaires, le comportement des mortiers avec additions est plus irrégulier. Une plus grande finesse des particules peut engendrer soit une diminution ou une augmentation des résistances en compression à 07 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, mais les résistances en compression à 28 jours sont peu influencées, par la finesse de l'addition. Ce comportement irrégulier est probablement dû à l'influence de la finesse et de la quantité des particules d'additions calcaires sur le processus d'hydratation du liant à jeunes âges.

VI. SYNTHÈSE

L'analyse de la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers avec additions en fonction du taux de substitution du ciment montre que le comportement des mortiers C1 et des mortiers C2 avec additions est similaire. Ces résistances varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité d'addition incorporée dans le mélange. L'action des additions calcaires sur le ciment est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges, à faible taux de substitution du ciment par l'addition. Cette accélération est plus ou moins équivalente pour toutes ces additions, mais elle est plus prononcée pour les additions de grande finesse. L'action des additions de pouzzolanes est assez limitée dans ce cas, mais les résistances en compression se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 07 jours d'âge, à cause de l'effet pouzzolanique qui commence à se déclarer tardivement. La présence des additions de laitier granulé des hauts fourneaux dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment (<20 %) limite la chute de la résistance en compression à 07 jours et procure un gain minime de résistance à 28 jours, en raison de leurs propriétés hydrauliques latentes qui sont tout de même atténuées par l'augmentation relative du besoin en eau des mortiers avec additions de laitier à même consistance. L'action de la fumée de silice sur les mortiers se caractérise par une chute des résistances en compression à 07 jours et un léger gain à 28 jours. Ce comportement, a été expliqué par le fait que les grains ultrafins de la fumée de silice pénètrent entre les hydrates du ciment et les empêchent de se développer aux cours des premières étapes de l'hydratation. Par contre, le

développement de l'action pouzzolanique de la fumée de silice permet d'améliorer significativement la résistance par rapport au mortier sans additions, malgré que son effet sur le ciment se trouve atténué par les besoins en eau importants nécessaires pour le maintien de la consistance de référence. L'ampleur de l'action pouzzolanique de la fumée de silice devient encore plus accentuée à long terme. Cette contribution des additions minérales à l'amélioration des résistances en compression à 07 jours et 28 jours est confirmée par plusieurs auteurs.

La variation des résistances à la traction à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, présente un comportement similaire aux résistances en compression pour les deux ciments utilisés. Ces résistances varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité d'addition incorporée dans le mélange. L'analyse des variations des résistances à la traction des mortiers C1 et C2 avec additions a permis de confirmer la très bonne corrélation de ces résistances avec les résistances en compression. De ce fait, les phénomènes à l'origine de la variation des résistances à la traction à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2, sont les mêmes que ceux qui ont été exposés pour les résistances en compression.

Les mortiers C2 avec additions présentent globalement des résistances en compression légèrement plus faibles que les mortiers C1, à 07 jours et plus importantes à 28 jours, mais la variation de résistances relatives en compression des mortiers avec additions est peu influencée par la nature du ciment utilisé.

La finesse des particules d'addition influe beaucoup sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours. Cette influence dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une diminution des résistances en compression à 07 jours et une augmentation des résistances en compression à 28 jours. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est grand. Pour les mortiers avec additions calcaires, le comportement est plus irrégulier. Une plus grande finesse des particules peut engendrer soit une diminution ou une augmentation des résistances en compression à 07 jours, sans trop influencer les résistances en compression à 28 jours.

EFFETS DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES MORTIERS SANS ADJUVANTS

I. GENERALITES

I.1. INTRODUCTION

Les mécanismes à l'origine des modifications engendrées dans les matériaux cimentaires par l'incorporation d'additions minérales paraissent particulièrement complexes, mais plusieurs études dans ce domaine s'accordent pour distinguer trois principaux effets qui se superposent pour influencer les propriétés du matériau cimentaire à l'état frais et durci : un effet granulaire, un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique.

L'effet granulaire est lié à toutes les modifications induites par la présence des additions minérales dans la structure granulaire d'un matériau cimentaire à l'état frais. Ces modifications peuvent résulter de la capacité d'empilement des particules fines ou ultrafines avec les autres composants solides du mélange et/ou de l'intensité des frictions entre les diverses particules du mélange. Cet effet granulaire peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale, la distribution granulaire et le potentiel zéta des particules d'addition utilisées ; qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires [13, 14]. Plusieurs études ont montré l'existence d'une optimisation des propriétés de la structure granulaire par l'incorporation des additions minérales de différentes natures et quantités. Lewandowski [15], Lange & al [16] et Bajou & al [19], ont montré que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de mortier ou béton conduisait à une amélioration de la fluidité ou à une réduction de la quantité d'eau dans les mélanges à même consistance. Kwan [21] et De Larard & al [22] ont montré que la fluidité d'un béton augmentait avec le pourcentage de la fumée de silice. Kronlof [20] a montré que l'incorporation de trois additions de quartz de finesses différentes dans une formulation de béton mène à la réduction du besoin en eau en relation avec la proportion et la finesse du matériau de substitution. Collins et Sanjayan [18], ont rapporté que la fluidité d'un béton était améliorée en remplaçant une partie du ciment par des additions ultrafines. D'autre part, Yijin & al [23], ont trouvé que l'incorporation de cendres volantes dans les pâtes de ciment, mortiers et bétons peut améliorer la fluidité du mélange, mais certaines additions plus grossières, ne pouvaient pas engendrer une réduction du besoin en eau. Dans le même contexte, Zhang et Han [24], ont montré aussi que la viscosité de la pâte de ciment variait avec la nature et la quantité d'addition. Bessa [7] a montré que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers peut engendrer pour une même consistance soit une augmentation ou une diminution du besoin en eau, et dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition incorporée. Gallias & al

[25,51] ont montré que l'introduction des additions minérales avec de grandes proportions dans les pâtes de ciment à consistance normalisée produisait une augmentation du besoin en eau.

Il en résulte donc que quand les particules des additions minérales modifient peu les frictions entre les grains et remplissent les porosités de la structure granulaire (ciment et agrégats) en libérant l'eau contenue dans ces pores, l'effet granulaire devient favorable et mène à l'amélioration de la fluidité du mélange frais pour une quantité d'eau constante, ou à la réduction de la quantité d'eau pour un consistance donnée et à l'amélioration de la compacité du mélange et des résistances mécaniques. Mais, quand les particules des additions minérales modifient fortement les frictions entre les grains dans les mélanges cimentaires ou ne remplissent pas les porosités de la structure granulaire, l'effet granulaire devient défavorable.

L'effet physico-chimique et microstructural est lié à toutes les modifications induites par les interactions multiples entre les particules des additions minérales sur le processus d'hydratation du ciment, et sur la structuration des produits hydratés. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment et facilite ainsi la formation d'une structure solide garantissant les premières résistances mécaniques [30, 31]. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire entraîne une augmentation du rapport effectif eau/ciment et conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [3]. Lilkov & al [26] a montré que la quantité des hydrates formés pendant les 24 premières heures dans une pâte cimentaire est plus significative dans les mélanges avec additions de fumée de silice et de cendres volantes que dans les mélanges sans additions minérales. Hanna [27] a montré que la quantité de la chaleur libérée pendant les 24 premières heures dans une pâte cimentaire est modifiée par l'incorporation de divers taux de fumée de silice. Lawrence et al [4] ont également montré que le degré d'hydratation à courts termes des mortiers contenant des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de référence sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes. Jiang & Van Damme [28] avaient déjà avancé ce genre de résultats en étudiant l'action des additions siliceuses et calcaires sur le processus d'hydratation du C_3S pur. Dans le même contexte Cyr & al [8], ont montré que le surplus d'hydratation du ciment dépendait de la quantité d'addition incorporée et que ce bénéfice d'hydratation croissait jusqu'à un taux de substitution du ciment puis commençait à décroître. Dans le domaine microstructurale et microchimique, Ramlochan & al [29], ont montré que l'incorporation de la pouzzolane et du laitier dans un mélange cimentaire, modifiait le

produit interne de la phase alite et la microstructure du matériau cimentaire était modifiée. Gutteridge & Dalziel [32] et Feldman & Cheng-Gi [33] ont montré que les additions minérales jouaient un rôle de sites préférentiels de nucléation pendant les réactions du ciment, permettant une meilleure distribution des produits hydratés et mènent ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire.

Il en résulte donc, que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit principalement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

L'effet chimique est lié à la capacité des additions minérales caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les composants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques aussi bien que les produits hydratés du ciment. Appa Rao [38] a montré que pour un rapport eau/ciment constant égal à 0,5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier jusqu'à 30 % de substitution du ciment, engendre une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier. Kwan [21] a également montré qu'indépendamment du rapport eau/ciment, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier jusqu'à 15 % de substitution du ciment, engendre une augmentation des résistances en compression à 28 jours. Demirboga [39] a montré que l'incorporation de 10 % de fumée de silice, engendrait une amélioration de la résistance en compression à 7, 28 et 120 jours, alors que les cendres volantes engendraient une diminution de la résistance en compression à tout âge et pour toutes les quantités. Le laitier granulé de hauts fourneaux engendrait une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours. Benzet & Benhassine [36] ont montré que le quartz cristallisé finement broyé, pouvait réagir dans certaines conditions avec le portlandite, mais que la quantification de l'activité chimique indépendamment de l'effet physico-chimique et microstructural était difficile et incertaine. De même, Lawrence [3] a montré que le degré d'hydratation des mortiers contenant des additions de quartz était plus significatif que celui des mortiers sans additions minérales. Cyr & al [12] ont confirmé la réactivité chimique des additions calcaires en comparant l'évolution des résistances mécaniques des mortiers avec des cendres volantes et des additions calcaires. D'une manière plus générale, Cyr & al [5], avaient avancé que la résistance en compression d'un mortier avec additions minérales était représentée comme étant la combinaison de trois effets qui se superposent : Un effet de dilution dû à la réduction de la quantité de ciment dans le mélange, un effet physique qui est dû à l'effet filler et à la nucléation hétérogène et un effet chimique qui est dû à la réaction pouzzolanique de certaines additions. Cette méthode rejoint l'approche utilisée par Lawrence dans l'étude de l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires [3].

Dans le même contexte, Lawrence & al [9] ont également avancé qu'il existait des mécanismes particuliers qui améliorent les résistances en compression des mortiers avec additions calcaires à partir de 2 jours, mais qui devenaient négligeable à 28 jours, sans que ce soit justifié par une réduction de la porosité.

Il en résulte donc que l'effet chimique quand il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural.

La norme européenne EN 206-1 définit les conditions de prise en compte des additions minérales en substitution partielle du ciment dans la formulation des bétons en considérant le concept de liant équivalent et définit un coefficient forfaitaire, k de prise en compte des additions minérales qui est déterminé pour les cendres volantes et les fumées de silice utilisées sous certaines conditions et avec un ciment de CEM I de classe 42.5 et plus (Chapitre I, § III.2). Ce coefficient définit la proportion de l'addition qui participe avec le ciment dans la notion du liant équivalent L_{eq} .

La quantité maximale de fumées de silice à prendre en compte pour le concept de coefficient k doit être inférieure à 0.11 de la masse du ciment. Les valeurs de k pour un béton à base de ciment CEM I sont :

$$\text{Pour } E/C \leq 0.45 \quad k = 2.0$$

$$\text{Pour } E/C > 0.45 \quad k = 2.0 \text{ sauf pour les classes d'exposition XC et XF, } k = 1.0$$

Pour des bétons utilisés en France, l'aptitude générale à l'emploi des additions est élargie aux laitiers granulés de hauts fourneaux, les additions calcaires et les additions siliceuses, mais en substitution seulement du ciment CEM I de classe 42,5 et supérieure.

Laitiers vitrifiés moulus de Hauts fourneau de classe B : $k = 0.9$

Additions calcaires : $k = 0.25$

Additions siliceuses: $k = 0.25$

Dans son approche Lawrence [3] a montré que la considération d'un coefficient K qui tient compte de l'activité chimique des additions minérales avec des valeurs standards comme dans le cas des normes française ou européenne ne pouvait pas être employée dans les modèles prédictifs de résistances usuels. Les travaux de Lawrence ont été confirmés par Kara Ali [6] qui a utilisé une approche expérimentale différente et considéré un nombre significatif d'additions minérales différentes par leurs natures minéralogiques, chimiques et morphologiques.

La norme européenne EN 206-1 limite l'application de la notion du liant équivalent aux additions du type II et à d'autres types d'additions dans la mesure ou l'aptitude à l'emploi est établie sans proposer aucune méthode permettant d'établir cette aptitude à l'emploi. La France étend son application aux additions de laitiers vitrifiés moulus de Hauts fourneau et même aux additions calcaires et siliceuses qui sont considérées par la norme européenne comme étant des additions quasi inertes du type I. Il en résulte donc que les normes

européennes ne proposent pas encore de cadre méthodologique rigoureux et unique pour définir le coefficient d'activité k d'un liant comprenant un ciment plus une addition minérale normalisée.

I.2. PRINCIPES D'ÉVALUATION DES EFFETS DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES MORTIERS

L'analyse de la variation des résistances en compression en fonction du taux de substitution du ciment par les additions n'indique pas la part spécifique des différents effets produits par la présence des particules d'additions dans les mortiers (effet granulaire, effet physico-chimique & microstructural et effet chimique).

Pour tenir compte de la part spécifique de ces différents effets, nous avons en premier lieu mis en évidence l'effet granulaire à caractère purement physique, agissant pendant les opérations de malaxage et de mise en oeuvre par rapport aux deux autres effets physico-chimique et chimique qui sont directement liés au processus d'hydratation du ciment. Pour distinguer l'activité chimique propre à chaque addition, nous avons étudié la variation du facteur d'activité chimique des additions (K) en fonction du taux de substitution du ciment.

Les effets ainsi définis ont été évalués en suivant une méthodologie expérimentale spécifique qui est basée sur deux conditions essentielles :

- L'introduction des additions dans le mélange en substitution volumique du ciment pour garantir le maintien du volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire dans les différents mélanges,
- Le maintien de la consistance du mélange frais constante pour garantir une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire pour toutes les formulations avec ou sans additions, permettant la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire, ce qui permet de limiter éventuellement la variation du volume d'air occlus.

La mise en évidence des différents effets des additions minérales sur les mortiers peut se baser sur les facteurs de compacité de Féret et de Bolomey qui tiennent compte des paramètres de formulation et caractérisent l'influence de la compacité initiale de la matrice cimentaire sur les résistances en compression. La différence entre ces deux facteurs porte exclusivement sur le fait que le facteur de compacité de Féret a une forme parabolique alors que le facteur de compacité de Bolomey a une forme linéaire.

Le facteur de compacité de Féret est désigné par : $\left(\frac{c}{c + e + v} \right)^2$

c , e et v désignent respectivement, les volumes du ciment, d'eau et d'air occlus dans le mortier avec additions en (l/m^3)

Le facteur de compacité de Bolomey est désigné par : $\left(\frac{C}{E+V} - 0.5 \right)$

C , E et V , désignent respectivement, la masse du ciment, la masse d'eau et la masse d'eau équivalente au volume d'air occlus dans le mélange en (kg/m^3).

L'étude de la variation de la résistance en compression en fonction des facteurs de compacité de Féret et de Bolomey, permettra de mettre en évidence les modifications engendrées par l'effet granulaire des additions sur la compacité de la matrice cimentaire indépendamment des effets physico-chimique et chimique (chapitre II, § III.3).

L'effet physique de l'addition peut être dans ce cas évalué en analysant la variation de la résistance en compression parallèlement à l'axe des abscisses (axe du facteur de compacité) et les effets physico-chimiques et chimiques peuvent être déduits par rapport aux mortiers sans additions de facteurs de compacité équivalents en analysant la variation de la résistance en compression parallèlement à l'axe des ordonnées (axe des résistances relatives).

L'activité chimique propre à chaque addition, a été évaluée en analysant la variation du facteur d'activité chimique des additions (K) en fonction du taux de substitution du ciment, en appliquant aux mortiers étudiés la notion de liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1 et en déduisant ce facteur à partir des modèles prédictifs de Féret et de Bolomey

Le facteur d'activité (K_F) déduit à partir du modèle prédictif de Féret est donné par l'équation (II.9) (chapitre II, § III.3):

$$K_F = \frac{c_r(e+v)\sqrt{R_c/R_{cr}}}{f[c_r(1-\sqrt{R_c/R_{cr}})+(e_r+v_r)]} - \frac{c}{f} \quad (\text{II.9})$$

c_r , e_r et v_r désignent respectivement, les volumes du ciment, d'eau et d'air occlus dans le mortier de référence sans additions en (l/m^3).

f , désigne le volume d'addition dans le mortier en (l/m^3).

R_c/R_{cr} , désigne la résistance relative en compression

Le facteur d'activité (K_B) déduit à partir du modèle prédictif de Bolomey est donné par l'équation (II.12) (chapitre II, § III.3) :

$$K_B = \frac{R_c C_r (E+V)}{R_{cr} F (E_r + V_r)} - \frac{C}{F} + \frac{E+V}{2F} \left(1 - \frac{R_c}{R_{cr}} \right) \quad (\text{II.12})$$

C_r , E_r et V_r , désignent respectivement, la masse du ciment, la masse d'eau et la masse d'eau équivalente au volume d'air occlus dans le mortier sans additions en (l/m^3).

F , désigne la masse d'addition dans le mortier en (l/m^3).

L'analyse de la variation des facteurs d'activité K_F et K_B en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition peut nous informer sur l'activité chimique propre à chaque addition étudiée.

II. MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS EFFETS DES ADDITIONS AGISSANT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS

Pour distinguer l'effet physique lié au comportement granulaire des additions, indépendamment des autres effets liés au processus d'hydratation du ciment, nous avons tracé la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, en fonction du facteur de la compacité de Féret, et du facteur de compacité de Bolomey, précédemment définis (chapitre II, § III.3).

Nous remarquons sur les figures (V.1) à (V.4) que le comportement global de la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions en fonction des facteurs de compacité de Féret et de Bolomey, est similaire pour les deux ciments utilisés. Toutes les valeurs des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions se placent à gauche de la courbe de référence du mortier sans additions pour les deux modèles de prédiction des résistances, indépendamment du facteur de compacité considéré. Ceci implique que l'incorporation des additions minérales dans les mortiers produit un effet physique lié au comportement granulaire plus ou moins défavorable, associé à une activité physico-chimique et probablement chimique des additions favorable plus ou moins forte. Ce comportement est étroitement lié à la nature et à la quantité de l'addition incorporée.

II.1. EXPRESSION DES RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS EN FONCTION DES FACTEURS DE COMPACITE

Les variations des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2, en fonction des facteurs de compacité de Féret et de Bolomey sont représentées par les figures (V1) et (V.2), respectivement.

Nous remarquons sur les figures (V1) et (V.2), que l'écart des courbes des résistances en compression à 07 jours des mortiers avec additions par rapport à la courbe de référence du mortier sans additions, est important pour toutes les additions utilisées, quelque soit le taux de substitution du ciment.

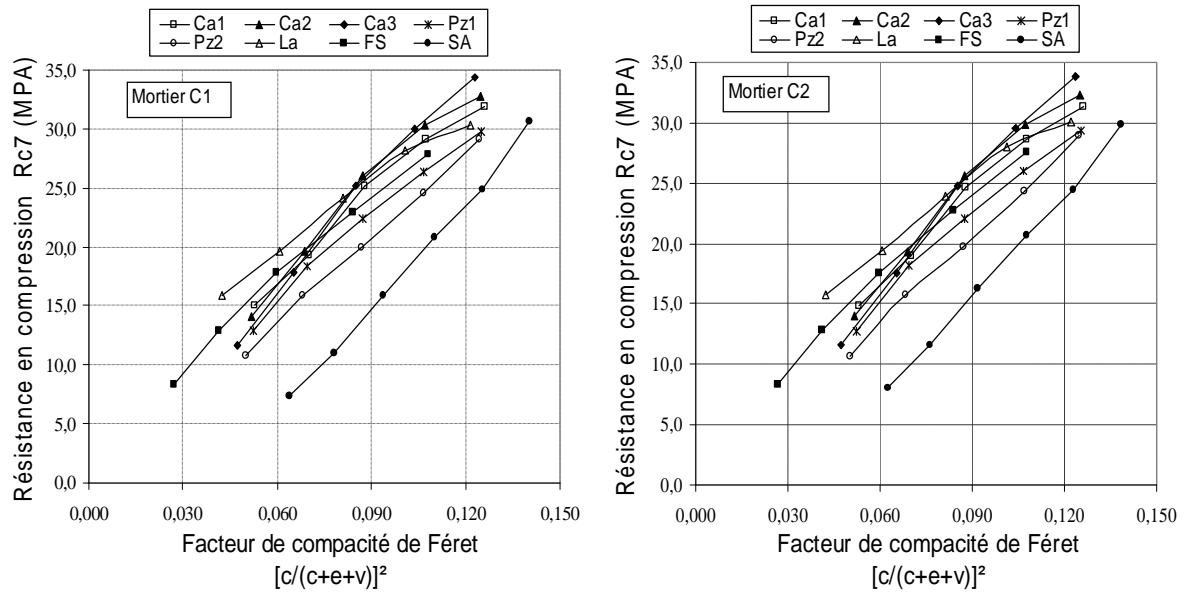


Figure V.1 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Fétet

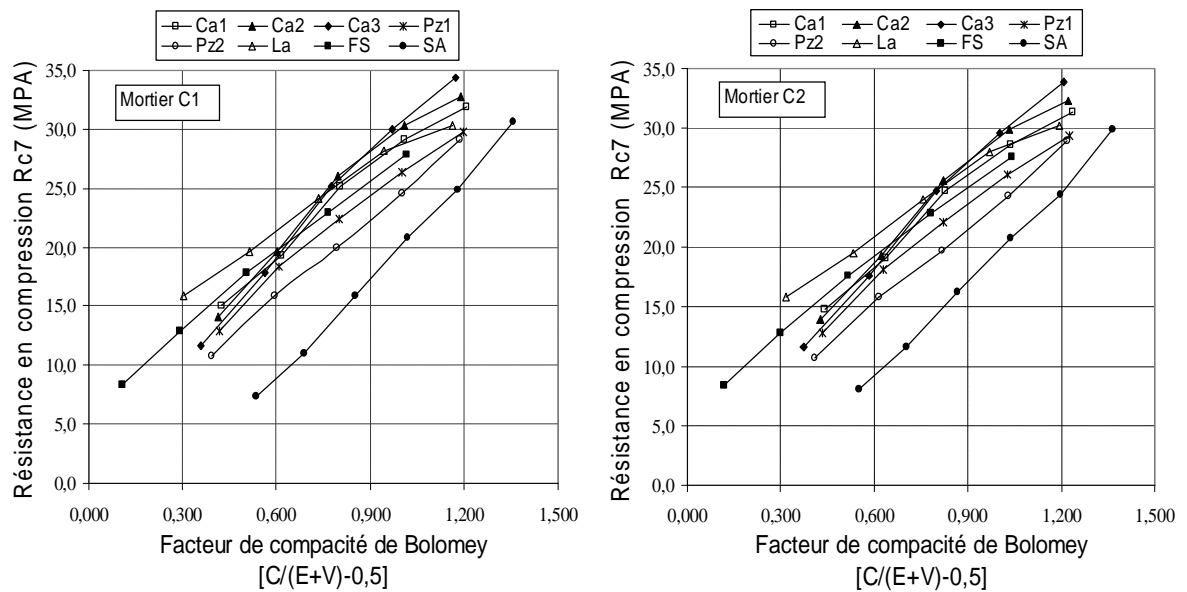


Figure V.2 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Bolomey

A faibles taux de substitution du ciment, les calcites (Ca1, Ca2 et Ca3) présentent l'effet global le plus important sur les résistances en compression à 07 jours en raison d'effets physico-chimiques et chimiques significatifs (accélération de l'hydratation du ciment) associés à un effet granulaire favorable ; le comportement global des calcites est d'autant plus important que la finesse de l'addition est grande. La fumée de silice qui est caractérisée par l'effet granulaire le plus défavorable, présente l'effet global le plus faible sur les résistances en compression à 07 jours. Les additions de laitier (La) et les additions de

pouzzolanes (Pz1 et Pz2) présentent un effet global intermédiaire qui est favorisé par des effets physico-chimiques et chimiques pour l'addition de laitier et un effet granulaire favorable pour les additions de pouzzolanes. A forts taux de substitution du ciment, les additions de laitier et de fumée de silice présentent l'effet global le plus important sur les résistances en compression à 07 jours qui est favorisé par les effets physico-chimiques et chimiques favorables pour ces additions, mais les mortiers avec additions (La), présentent le meilleur comportement global, en raison d'un effet granulaire moins défavorable que pour la fumée de silice. Les additions calcaires et de pouzzolanes présentent des effets physico-chimiques et chimiques plus faibles avec une contribution plus prononcée pour les additions calcaires. Dans ce cas, le comportement global de ces additions est d'autant plus faible que la finesse de l'addition est importante en raison d'un effet granulaire défavorable dominant.

II.2. EXPRESSION DES RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION DES FACTEURS DE COMPACITE

Les variations des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2, en fonction des facteurs de compacité de Féret et de Bolomey sont représentées par les figures (V.3) et (V.4), respectivement.

Nous remarquons que les additions calcaires (Ca1, Ca2 et Ca3) présentent le comportement global le plus faible avec des effets physico chimiques et chimiques très réduits associés à un effet granulaire favorable réduit à faibles taux de substitution du ciment ou défavorable souvent dominant pour les forts taux de substitution du ciment.

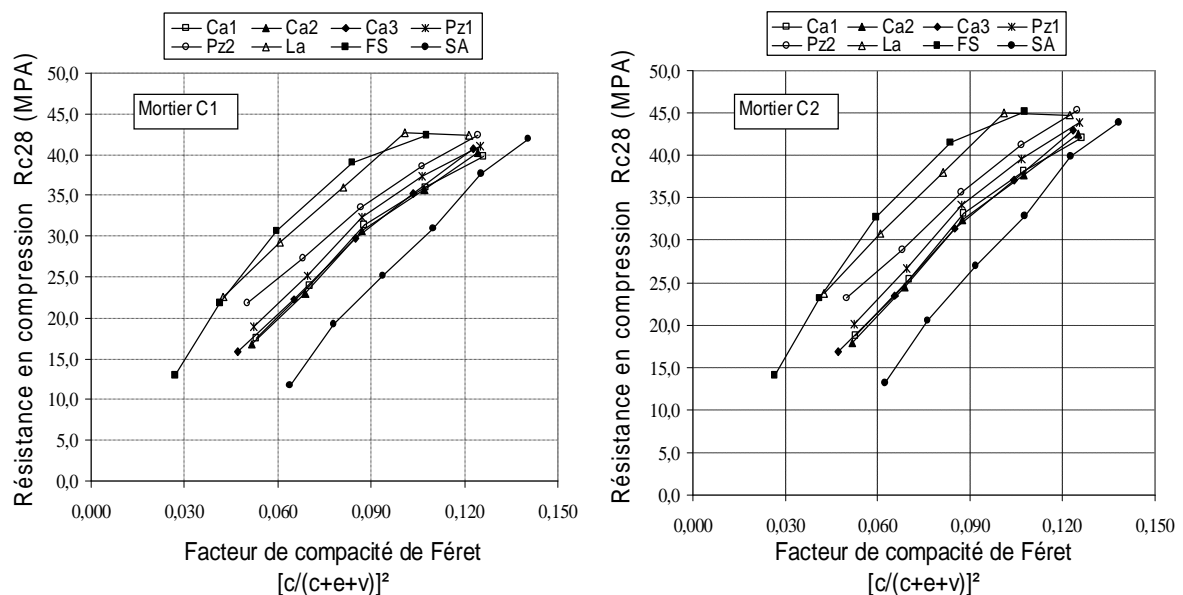


Figure V.3 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Féret

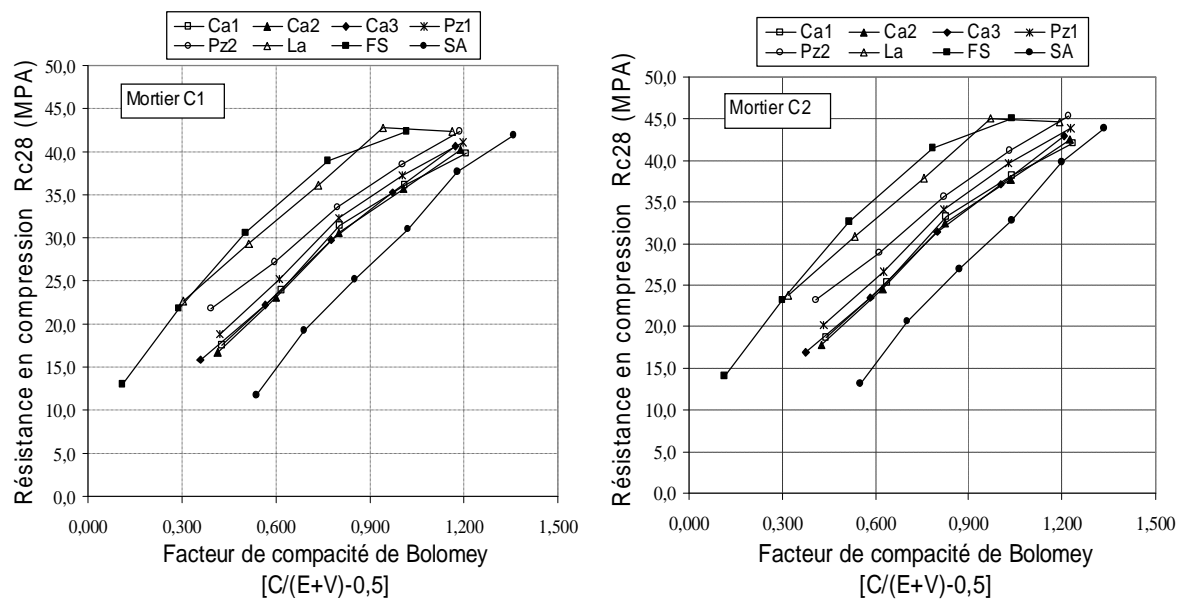


Figure V.4 : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 en fonction des facteurs de compacité de Bolomey

Dans ce cas, l'écart des courbes des résistances en compression des mortiers avec additions calcaires par rapport à la courbe de référence du mortier sans additions est moins important que dans le cas des résistances en compression à 07 jours. Les additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2) présentent un comportement global meilleur que celui des additions calcaires avec un effet granulaire favorable réduit à faibles taux de substitution du ciment ou défavorable à forts taux de substitution du ciment associés à des effets chimiques plus prononcés, en raison probablement de réactions pouzzolaniques qui sont plus déclarées dans le cas des additions (Pz2), de finesse plus importante. Dans ce cas, l'écart des courbes des résistances en compression des mortiers avec additions de pouzzolanes par rapport à la courbe de référence du mortier sans additions est plus important que dans le cas des résistances en compression à 07 jours. Ceci est plus visible pour le cas du mortier C2, en raison probablement de la présence d'ajouts de pouzzolanes dans la composition du ciment composé C1, qui ont tendance, en plus grande quantité, à limiter l'incidence de ces effets physico-chimiques et chimiques sur l'hydratation du liant. Les additions de laitier et de fumée de silice présentent les effets chimiques les plus importants pour tous les taux de substitution du ciment. A faibles taux de substitution du ciment, leurs effets chimiques favorables permettent de compenser l'effet granulaire défavorable qu'engendrent ces additions et produisent ainsi un léger gain de résistance à 28 jours. A plus forts taux de substitution, l'effet granulaire défavorable devient prédominant, ce qui provoque une chute de résistance de tous les mortiers avec additions, qui est plus prononcée pour les additions de fumée de silice.

D'autre part, nous pouvons remarquer aussi que la variation de la résistance des différents mortiers avec additions est pratiquement parallèle à celle du mortier sans additions avec de légères variations en fonction du taux de substitution du ciment. Ceci peut suggérer que les effets physico-chimiques et chimiques engendrent un gain de résistance quasi constant par rapport à la courbe de référence du mortier sans additions indépendamment des variations de la compacité engendrées par l'effet granulaire des additions. Ce comportement peut être expliqué par le fait que l'effet granulaire plutôt défavorable, exception faite des additions fines (Ca1, Ca2, Pz1 et Pz2), à faibles taux de substitution, demeure souvent quantitativement comparable au bénéfice obtenu par les deux autres effets physico-chimiques et chimiques, ce qui permet d'expliquer pourquoi l'effet global de la fumée de silice par exemple produit une amélioration limitée de la résistance en compression malgré ses propriétés pouzzolaniques importantes.

D'autre part ce comportement confirme aussi l'existence d'effets physico-chimiques et chimiques pour les additions calcaires et de pouzzolanes à jeunes âges et qui se prolongent jusqu'à 28 jours. L'action favorable de ces effets sur les résistances en compression, n'est prédominante qu'à 07 jours pour les additions calcaires et à 28 jours pour les additions de pouzzolanes.

En effet, plusieurs auteurs ont confirmé que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agissait principalement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis [4, 8, 26-29, 32, 33]. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment [30, 31]. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [3]. L'effet chimique des additions permet de les faire contribuer à l'évolution des résistances mécaniques aussi bien que les produits hydratés du ciment. Plusieurs auteurs ont montré que l'incorporation de quantités d'additions minérales peut engendrer dans certains cas des augmentations des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier [3, 5, 9, 12, 21, 28, 39]. Ce comportement dépend de la nature, la quantité et la finesse de l'addition incorporée et concerne essentiellement les additions actives du type II selon la norme européenne EN 206-1, mais peut concerner aussi des additions considérées comme étant quasi inertes par la même norme [3, 5, 9, 12, 28].

Dans le cadre de cette étude cet effet physico-chimique et microstructural est tout à fait visible à jeunes âges pour toutes les additions et spécialement pour les additions calcaires (Ca3), qui parviennent à améliorer les résistances en compression à 07 jours avec un effet granulaire défavorable. D'autre part, l'effet chimique a été observé pour toutes les additions

et spécialement pour la fumée de silice et le laitier qui parviennent à maintenir la résistance en compression à 28 jours, malgré un effet granulaire défavorable.

L'effet granulaire favorable ou défavorable des mortiers avec additions a été confirmé par plusieurs études et dépend de plusieurs facteurs [13,14]. En effet plusieurs études [15, 16, 18-21], ont montré l'existence d'une optimisation des propriétés de la structure granulaire par l'incorporation des additions minérales de différentes natures et quantités. Néanmoins, certains auteurs [7, 23-25, 51], ont relevé que l'incorporation des additions minérales dans les matériaux cimentaires pouvaient réduire la fluidité ou augmenter le besoin en eau des mélanges à même consistance, dans certains cas en fonction de la nature, de la quantité de la morphologie et de la finesse de l'addition incorporée dans le mélange cimentaire.

Dans le cadre de cette étude l'effet favorable des additions étudiées n'a été remarqué que pour les faibles taux de substitution de ciment par les additions minérales fines. Dans ce cas le besoin en eau des mortiers avec additions est directement liée aux phénomènes de l'empilement granulaire, et donc à la compacité des mélanges à l'état frais. A plus forts taux de substitution l'effet granulaire devient défavorable. Pour les mortiers avec additions de fumée de silice (ultrafine) et à la différence de plusieurs études [21,22], L'effet granulaire était totalement défavorable. En effet, la petite dimension des particules des additions les rend beaucoup plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide.

III. ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS MINERALES

L'activité chimique des additions à 07 jours et 28 jours, peut être évaluée en traçant la variation des facteurs d'activité chimique précédemment définis (chapitre II, § III.3), en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition (figures V.5 à V.8), en utilisant la notion du liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1 et en déduisant le facteur d'activité chimique à partir des modèles prédictifs de Féret (Eq. II.9) et de Bolomey (Eq. II.12).

Les figures (V.5) à (V.8), montrent que les facteurs d'activité chimique à 07 jours et 28 jours, des différentes additions sont très variables. Ils dépendent de l'âge du mortier avec additions, de la nature du ciment utilisé, du modèle de résistance adopté, de la nature minéralogique et chimique de l'addition, de ses caractéristiques granulaires et du taux de substitution de ciment par les additions. D'une façon générale, les facteurs d'activité chimique à 07 jours et 28 jours des différentes additions sont plus importants pour les mortiers C2 que pour les mortiers C1. Ils sont encore plus forts dans le cas d'adoption du modèle prédictif de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret.

III.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 07 JOURS

Les variations des facteurs d'activité chimique des additions à 07 jours, en fonction des taux de substitution du ciment par les additions pour les mortiers C1 et C2 sont représentées par les figures (V.5) et (V.6), pour les modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement.

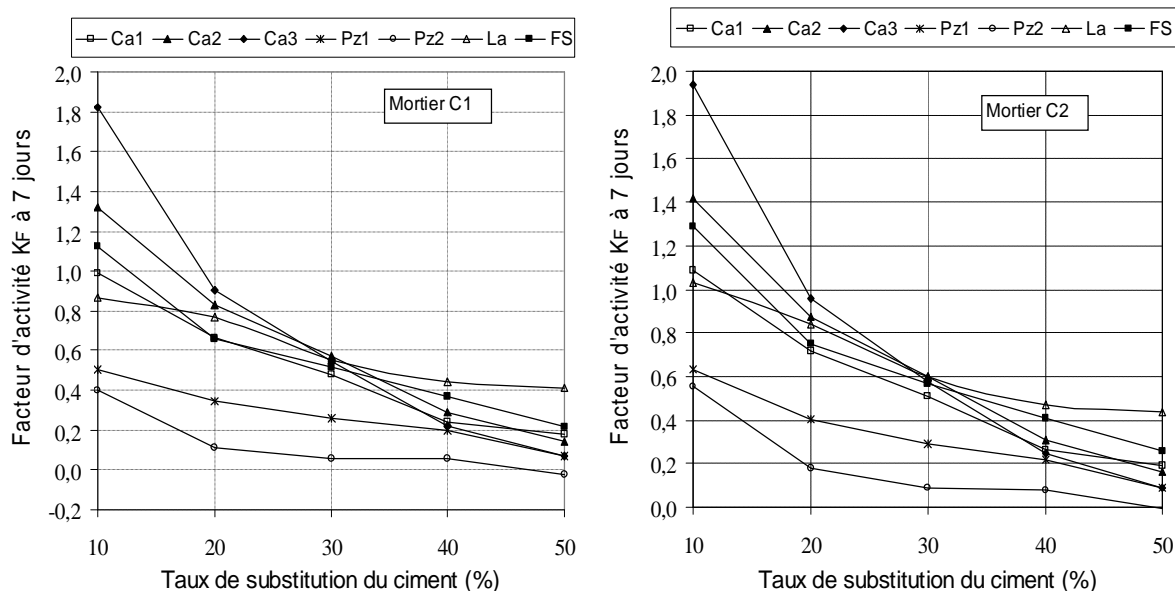


Figure V.5 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés à partir du modèle de Féret, en fonction des taux de substitution du ciment pour les mortiers C1 et C2

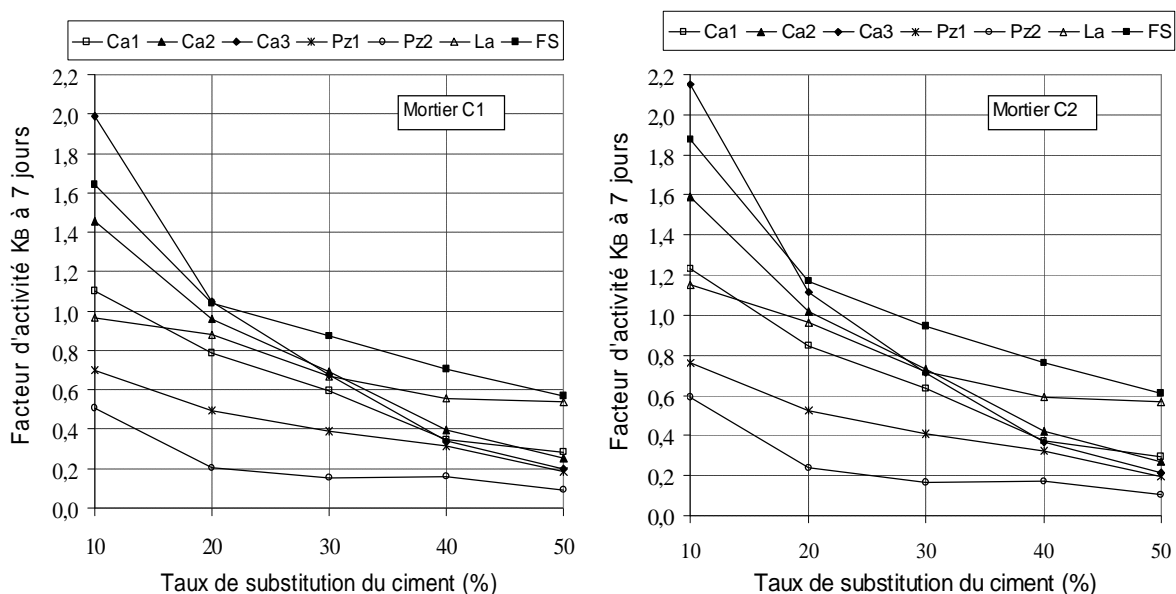


Figure V.6 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey, en fonction des taux de substitution du ciment pour les mortiers C1 et C2

C2

À faibles taux de substitution du ciment, Les additions calcaires (Ca3) présentent à 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité à 07 jours le plus important parmi toutes les additions utilisées. Il atteint des valeurs de 1.82 et 1.94 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 1.99 et 2.15 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Bolomey. Les facteurs d'activité des additions calcaires sont dans ce cas, significatifs en raison d'effets physico-chimiques favorables à cet âge du mortier, qui sont d'autant plus forts que la finesse de l'addition est grande.

La fumée de silice présente à 10 % du taux de substitution du ciment, un facteur d'activité intermédiaire entre celui des additions Ca1 et Ca2 dans le cas des facteurs calculés à partir du modèle de Féret et entre celui des additions Ca2 et Ca3 dans le cas des facteurs calculés à partir du modèle de Bolomey, pour les deux ciments utilisés. Les additions de laitier et de pouzzolanes présentent des facteurs d'activité plus faibles, avec une meilleure activité pour l'addition de laitier à 10 % du taux de substitution du ciment, pour laquelle le facteur d'activité atteint des valeurs de 0.87 et 1.03 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 0.97 et 1.15 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans cas du modèle de Bolomey.

À forts taux de substitution de ciment, la fumée de silice et les additions de laitier deviennent plus actives en raison d'effets physico-chimiques favorables. Les additions de pouzzolanes (PZ1 et PZ2) présentent les facteurs d'activité les plus faibles pour tous les taux de substitution du ciment, et sont d'autant plus faibles que la finesse de l'addition est grande.

III.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 28 JOURS

Les variations des facteurs d'activité chimiques des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2, en fonction des taux de substitution du ciment par les additions sont représentées par les figures (V.7) et (V.8), pour les modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement.

À faibles taux de substitution du ciment, la fumée de silice présente à 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité à 28 jours le plus important parmi toutes les additions utilisées. Il atteint des valeurs de 1.99 et 2.2 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 2.74 et 2.96 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans cas du modèle de Bolomey. Les facteurs d'activité des additions calcaires sont dans ce cas, les plus faibles en raison de l'atténuation des effets physico-chimiques qui sont d'autant plus faibles que la finesse de l'addition est petite. Les additions de laitier et de pouzzolanes présentent des facteurs d'activité intermédiaires, avec une meilleure activité pour l'addition de laitier à 20 % du taux de substitution du ciment, pour laquelle le facteur d'activité atteint des valeurs de 1.03 et 1.11 pour les mortiers C1 et C2,

respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 1.13 et 1.23 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans cas du modèle de Bolomey.

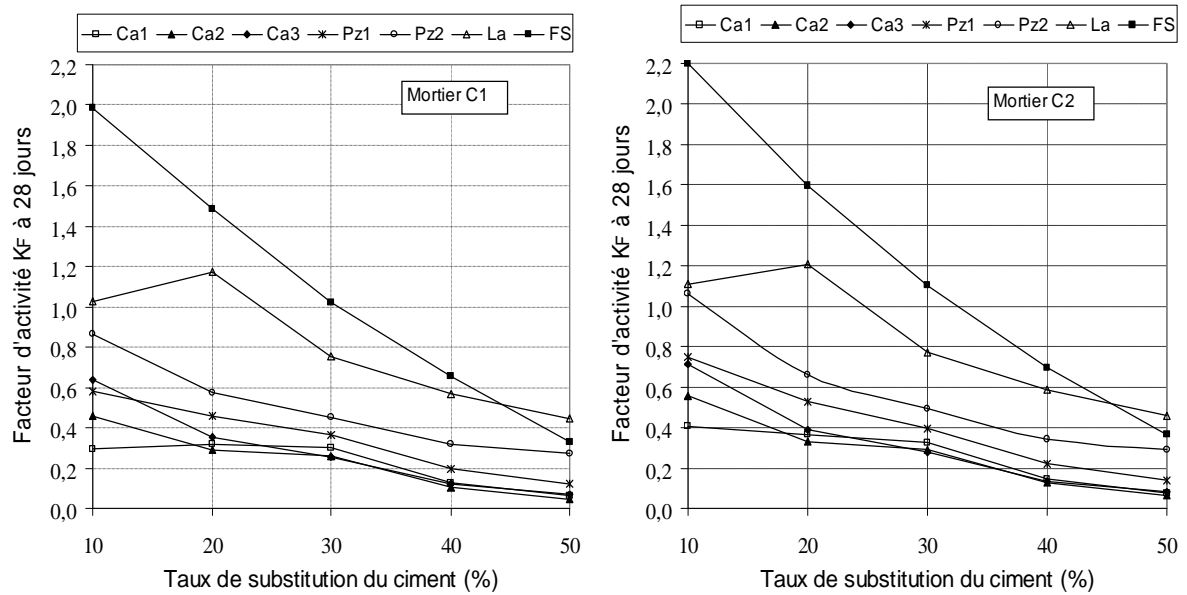


Figure V.7 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de Féret, en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2

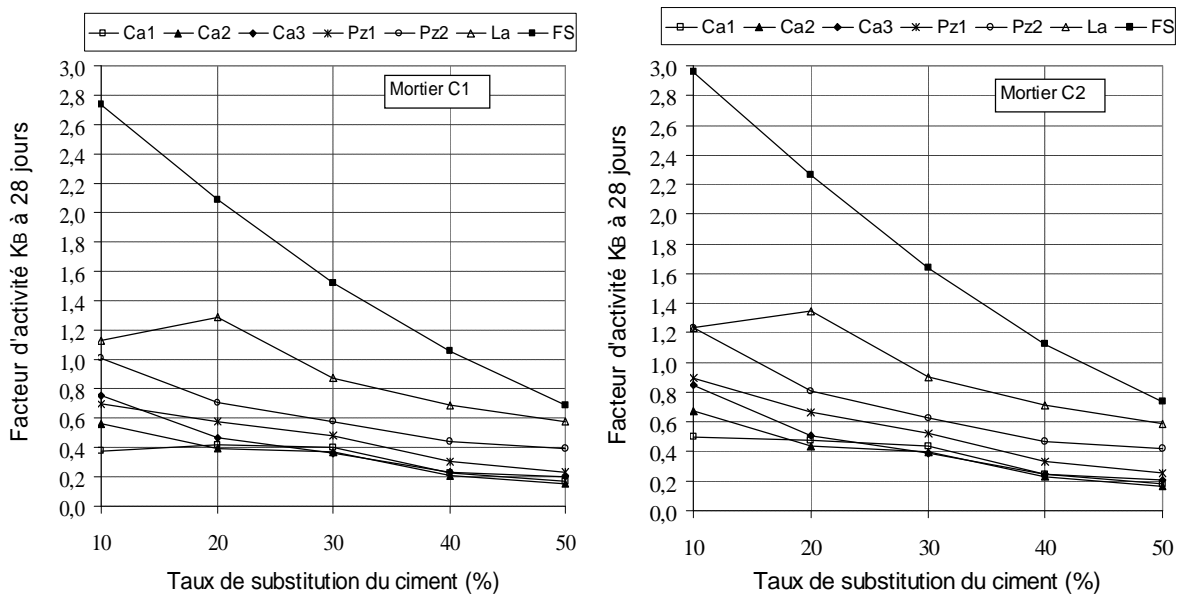


Figure V.8 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey, en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2

À forts taux de substitution du ciment, les additions calcaires sont aussi les moins actives chimiquement. Les additions de laitier et de pouzzolanes présentent un

comportement intermédiaire avec une meilleure activité pour les additions (La) caractérisées par des propriétés hydrauliques latentes. Les additions (Pz2) présentent des facteurs d'activité plus forts que les additions (Pz1) de finesse moins importante.

Nous pouvons également noter sur les figures (V.5) à (V.8), que les facteurs d'activité des différentes additions utilisées, décroissent avec le temps pour les additions calcaires, alors qu'ils croissent pour toutes les autres additions, pour les deux ciments utilisés.

Ces résultats pour les facteurs d'activité à 07 jours et 28 jours, rejoignent les conclusions avancées précédemment dans le paragraphe II, et mettent en évidence l'activité physico-chimique des additions calcaires à 07 jours d'âge des mortiers, à l'origine de l'accélération de l'hydratation du ciment dans les mortiers avec additions calcaires à jeunes âges, qui réagissent probablement avec la phase alumineuse du ciment. Cette activité est très réduite à 28 jours, mais ne disparaît pas totalement. De même, ils confirment l'activité chimique de la fumée de silice qui est capable de développer une réaction pouzzolanique en milieu riche en chaux dont l'effet est plus visible à 28 jours d'âge du mortier. Cette propriété peut aussi concerner les particules les plus fines des additions de pouzzolane. Les additions de laitier confirment leur activité chimique en raison de leurs propriétés hydrauliques latentes, dont les effets sont équivalents à 07 jours ou à 28 jours.

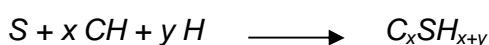
L'activité chimique des additions minérales à 07 jours et 28 jours est confirmée par plusieurs auteurs tels que Lawrence & al [4, 9], Cyr & al [5, 8, 12], Lilkov & al [26], Hanna [27], Jiang & Van Damme [28], Ramlochan & al [29], Gutteridge & Dalziel [32], Feldman & Cheng-Gi [33], Benzet & Benhassine [36]. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'action des additions sur le processus d'hydratation du ciment. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment et facilite ainsi la formation d'une structure solide garantissant les premières résistances mécaniques. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire entraîne une augmentation du rapport effectif eau/ciment et conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettrait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace. De ce fait les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions de ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire. D'autres auteurs ont aussi retenu que l'amélioration des résistances en compression est sûrement dû aux phénomènes de nucléation hétérogène qui engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment par un processus physique [4, 5, 9, 21, 36], qui dépend de la finesse des particules d'additions, de la quantité d'addition dans le mélange et de l'affinité de la poudre d'addition (nature) avec les hydrates de ciment. Cyr & al ont conclu que cet effet physique augmentait avec la finesse de l'addition et confirment que la

quantité optimale d'addition était de 25 % et 35 %, car au-delà de cette quantité l'effet s'escompte en raison de l'éloignement d'une partie des additions pour participer à la nucléation du processus d'hydratation du ciment.

On peut donc retenir que :

Pour les additions calcaires, la calcite (CaCO_3) peut réagir en présence de l'eau avec les aluminates du ciment (C_3A , C_4AH_{13}), pour former un mono-carboaluminate de calcium hydraté du type ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) cristallisés en fines plaquettes hexagonales [5].

Pour la fumée de silice et les pouzzolanes, la silice amorphe réagit en présence de l'eau avec la portlandite formé pendant l'hydratation du ciment pour former le silicate de calcium hydraté suivant la réaction suivante [7]:



Le laitier granulé des hauts fourneaux finement broyé ne s'hydrate pas en présence d'eau à cause de la formation d'une couche acide autour du grain du laitier empêchant ce dernier de s'hydrater. La portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérée pendant l'hydratation du ciment va dissoudre cette couche acide, et entre ainsi en réaction avec les minéraux du laitier pour former un silicate de calcium hydraté (CSH ou tobermorite), l'aluminate tetra-calcique hydraté sous forme de cristaux hexagonaux, l'étringite et l'hydroxyde de calcium [92].

D'autre part, ces résultats confirment l'analyse effectuée pour la variation des résistances en compression en fonction des facteurs de compacité de Féret et de Bolomey où nous avons constaté que la fumée de silice a présenté une activité pouzzolanique significative à 28 jours et que sa finesse a produit des effets physico-chimiques favorables à 07 jours à forts taux de substitution de ciment, tandis que les additions calcaires ont présenté un effet physico-chimique favorable à 07 jours qui a été atténué considérablement à 28 jours.

L'analyse des résultats obtenus pour les facteurs d'activité des additions à 28 jours, par rapport à la norme européenne EN 206-1, permet de constater ce qui suit :

- La norme européenne préconise un facteur d'activité $k = 2.0$ pour la fumée de silice pour le ciment CEM I de classe 42.5 et plus.

Dans le cas de cette étude, la valeur de k à 10 % du taux de substitution du ciment, est de 1.99 et 2.2 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 2.74 et 2.96 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans cas du modèle de Bolomey. Il en résulte donc que la valeur de k est pratiquement justifiée pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Néanmoins le modèle de Féret de précision plus importante (expression parabolique), engendre un coefficient k juste limite (1.99) dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5)

Pour des bétons utilisés en France, l'aptitude générale à l'emploi des additions est élargie aux laitiers granulés de hauts fourneaux, les additions calcaires et les additions siliceuses, en substitution du ciment CEM I de classe 42,5 et supérieure.

- La valeur préconisée pour les additions calcaires est $k = 0.25$.

Dans le cas de cette étude, la valeur de k à 10 % du taux de substitution, varie de 0.3 à 0.67 et 0.41 à 0.71 pour les additions calcaires pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 0.38 à 0.75 et 0.5 à 0.84 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est largement justifiée pour les additions calcaires de différentes finesses, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 20 % et 30 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement.

- La valeur préconisée pour les additions siliceuses est $k = 0.25$.

Dans le cas de cette étude, la valeur de k à 10 % du taux de substitution, varie de 0.58 à 0.87 et 0.75 à 1.06 pour les additions de pouzzolanes pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 0.7 à 1.0 et 0.89 à 1.24 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est largement justifiée pour les additions de pouzzolanes de différentes finesses, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 30 % et 40 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement.

- La valeur préconisée pour les additions de laitier vitrifié moulu est $k = 0.9$.

Dans le cas de cette étude, la valeur de k varie à 10 % et 20 % du taux de substitution, de 1.03 à 1.17 et 1.11 à 1.21 pour les additions de laitier pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 1.13 à 1.29 et 1.23 à 1.35 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est justifiée pour les additions de laitier, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey.

Il en résulte donc, que les facteurs d'activité évalués dans le contexte de cette étude sont très variables et dépendent de la nature de l'addition incorporée, ses caractéristiques granulaires, sa proportion dans le mélange, la nature du ciment utilisé, l'âge du mortier considéré et le modèle de résistance adopté.

Cette conclusion rejoint celle de Lawrence [3], qui a montré que la considération d'un coefficient k qui désigne l'activité des additions de manière forfaitaire comme dans le cas de la normalisation européenne et ses application en France, ne pouvait pas être utilisé dans

les modèles prédictifs, car les résultats obtenus ont démontré que la valeur de ce coefficient est variable et dépendait de l'âge et des paramètres de formulation du béton ou du mortier tels que, la nature, le dosage et la finesse de l'addition, du type et du dosage en ciment et le dosage en eau et en granulats. Plusieurs études telles que celles de Babu et Rao [45], Goplan [46], Kara Ali [11] et Bessa [7] confirment ce point de vue.

Toute fois, les facteurs d'activité obtenus dans le cadre de cette étude, restent bien justifiés par la norme européenne EN 206-1 et ses applications en France. Ceci est vrai pour les deux ciments utilisés et pour les deux modèles prédictifs de résistance de Féret et de Bolomey. Néanmoins, il est important de noter que les facteurs d'activité évalués à partir du modèle prédictif de Bolomey sont beaucoup trop surestimés pour le cas de la fumée de silice par rapport à ceux calculés à partir du modèle prédictif de Féret de meilleure précision (expression parabolique)

IV. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES FACTEURS D'ACTIVITES CHIMIQUES

Conformément à la norme européenne EN 206-1 sur l'activité des additions minérales, la corrélation des facteurs d'activité des additions utilisés dans les mortiers C1 et C2 a concerné uniquement les facteurs d'activité des additions à 28 jours (figure V.9).

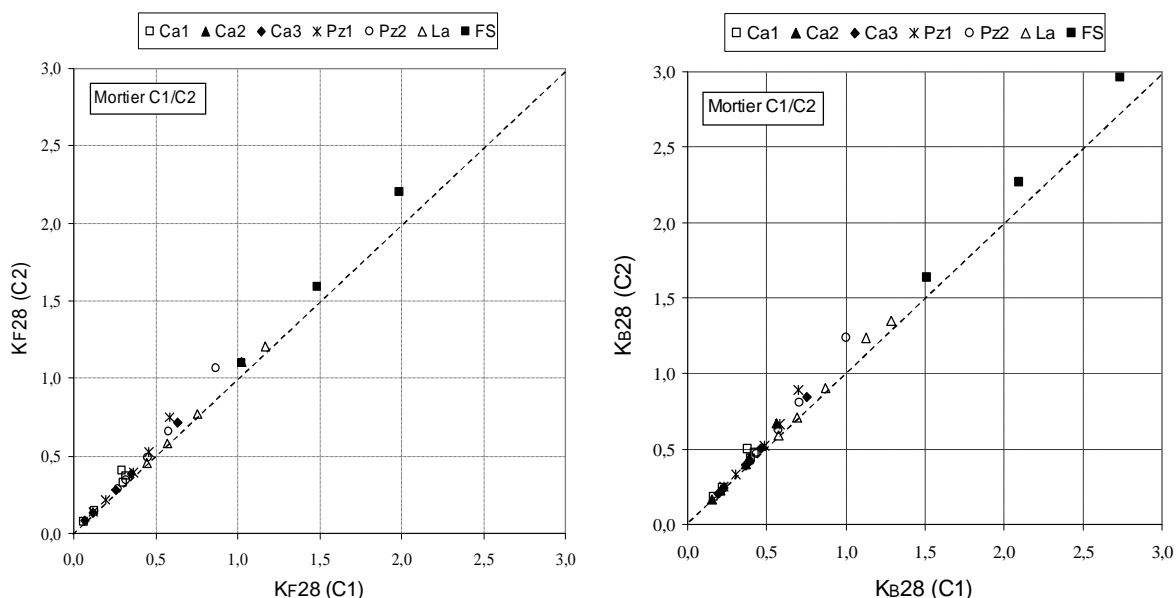


Figure V.9 : Corrélation (C1/C2), des facteurs d'activité des additions à 28 jours, pour les modèles de Féret (K_F) et de Bolomey (K_B)

Nous pouvons constater que tous les points expérimentaux des facteurs d'activité, se placent à gauche de la bissectrice du côté de l'axe des facteurs d'activité des mortiers C2, pour les deux modèles de résistance adoptés. Ceci confirme que les facteurs d'activité à 28 jours des additions sont plus importants pour les mortiers C2 que pour les mortiers C1. Nous pouvons également confirmer que les facteurs d'activité calculés à partir du modèle de Bolomey sont plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret. L'écart par rapport à la bissectrice est plus visible en général pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions, mais tend à se réduire pour les forts taux de substitution.

Ces écarts entre les facteurs d'activité des additions dans les mortiers C1 et C2 peuvent être quantifiés en analysant les variations des facteurs d'activité à 28 jours entre les mortiers C1 et C2 avec additions pour les modèles de résistance de Féret et de Bolomey, notées $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$, respectivement, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition (figure V.10).

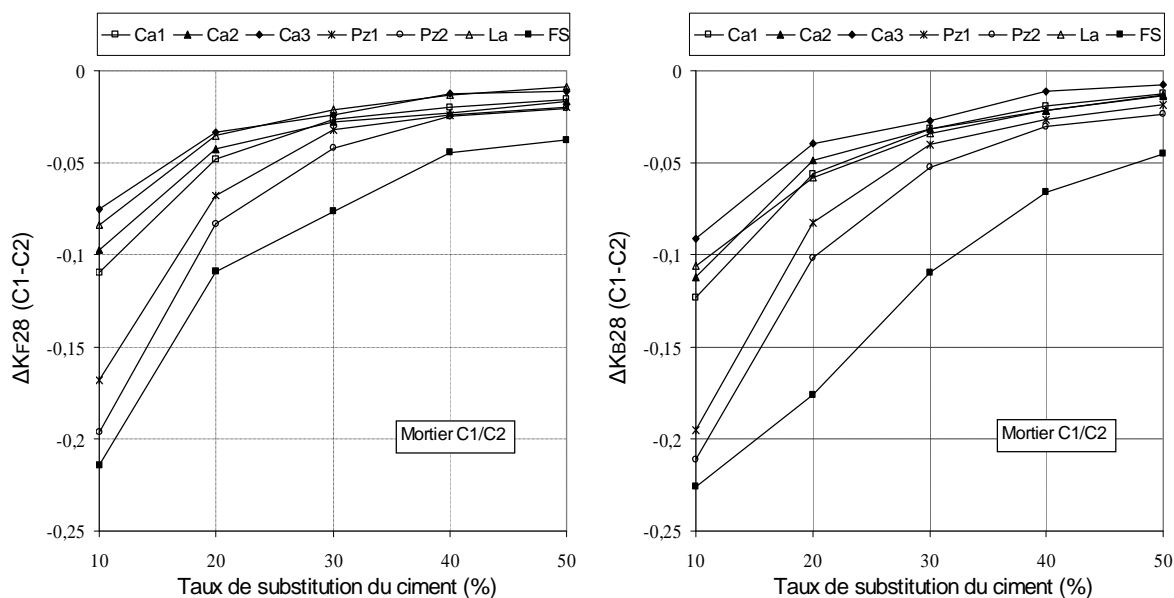


Figure V.10 : Variation des facteurs d'activité des additions $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les modèles de Féret et de Bolomey

Nous pouvons confirmer que les mortiers C2 avec additions présentent globalement des facteurs d'activité à 28 jours légèrement plus forts que les mortiers C1 avec additions. En général, les variations $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$ sont d'autant plus faibles en valeur absolue que le taux de substitution du ciment par l'addition est important. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la variation des facteurs d'activité à 28 jours des mortiers

avec additions est atténuée au fur et à mesure de la diminution de la quantité du ciment dans le mélange aux dépens de la quantité d'addition considérée.

Les variations $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$ des facteurs d'activité des additions se situent pour les additions calcaires et de laitier dans un intervalle assez réduit, entre -0,11 et -0,01 pour le modèle de Féret et -0,12 et -0,01 pour le modèle de Bolomey. Pour les additions de fumée de silice et de pouzzolanes, elle varie dans un intervalle légèrement plus étendu, entre -0,21 et -0,02 pour le modèle de Féret et -0,23 et -0,02 pour le modèle de Bolomey. Ceci suggère que la nature du ciment modifie peu à légèrement, l'activité chimique des additions à 28 jours ; c'est d'autant plus vrai que la quantité d'addition augmente dans le mélange cimentaire.

V. INFLUENCE DU MODELE PREDICTIF DE RESISTANCE SUR LE CALCUL DES FACTEURS D'ACTIVITES DES ADDITIONS

L'influence du modèle de résistance sur le calcul des facteurs d'activité à 28 jours, des additions dans les mortiers C1 et C2, peut être analysée en représentant la corrélation des facteurs d'activité des additions dans les mortiers C1 et C2, calculés à partir des modèles de résistance de Féret (KF) et de Bolomey (KB) (figure V.11).

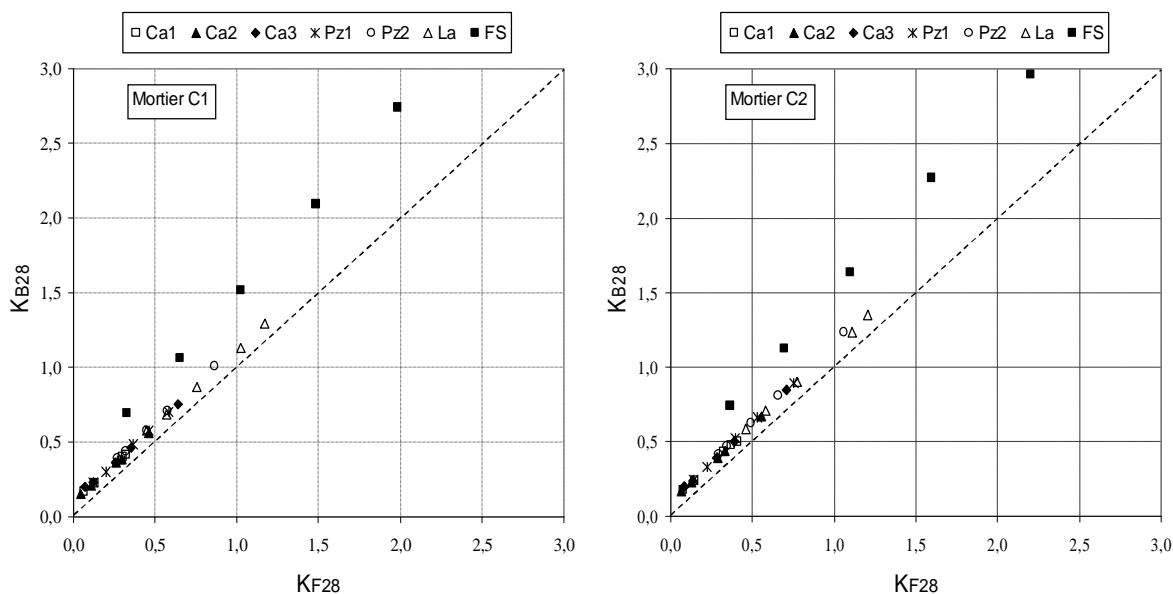


Figure V.11 : Corrélation (KB/KF) des facteurs d'activités des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 avec additions

Nous pouvons remarquer que tous les points expérimentaux des facteurs d'activité à 28 jours des mortiers C1 et C2, calculés à partir du modèle de Féret (KF) et du modèle de

Bolomey (KB), se placent à gauche de la bissectrice du côté de l'axe des facteur d'activité calculés à partir du modèle de Bolomey. Ceci confirme que les facteurs d'activité à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey sont toujours plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret, quelque soit la nature du ciment utilisé. En général, l'écart par rapport à la bissectrice est minime pour toutes les additions à l'exception de la fumée de silice (addition ultrafine).

Ces écarts peuvent être quantifiés en analysant les variations $\Delta(K_{B28}-K_{F28})$, qui représentent l'écart entre les valeurs des facteurs d'activité des additions calculés à partir des modèles de Bolomey et de Féret pour les mortiers C1 et C2 avec additions à 28 jours (figure V.16).

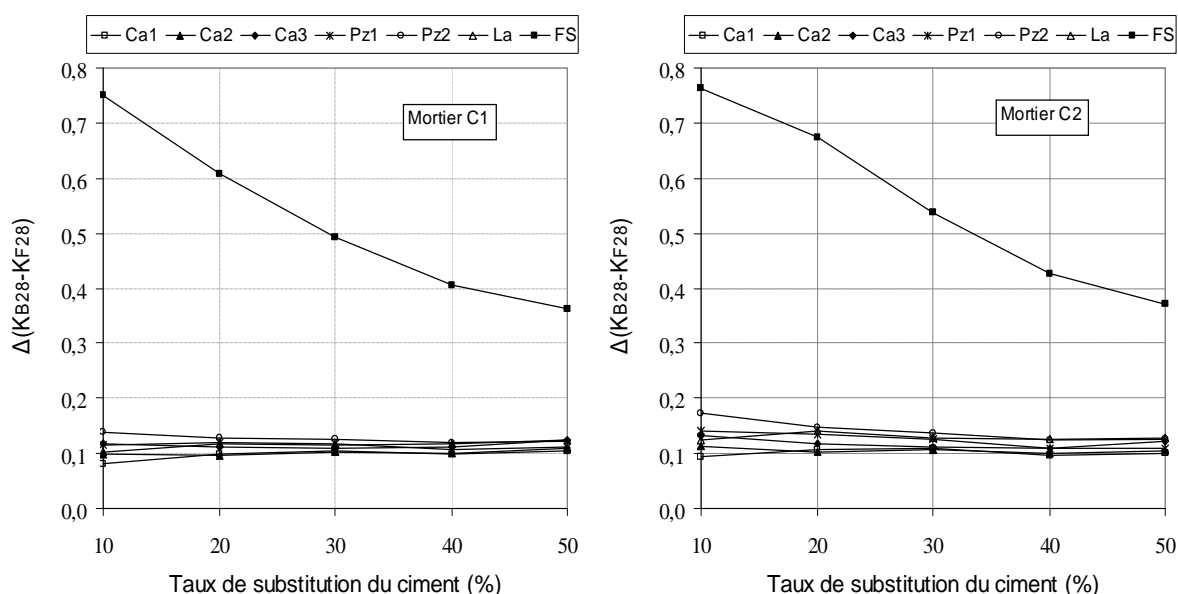


Figure V.12 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Bolomey (KB) et de Féret (KF) dans les mortiers C1 et C2 avec additions

Nous remarquons que la variation des facteurs d'activité à 28 jours, calculés à partir des modèles de Bolomey et de Féret est toujours positive. Ceci confirme que les facteurs d'activité à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey sont toujours plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret, quelque soit la nature du ciment utilisé. D'autre part, nous pouvons constater que cette variation est un peu plus visible dans le cas du mortier C2 avec additions que dans le cas du mortier C1 avec additions, mais se limite dans un intervalle très réduit pour toutes les additions utilisées à l'exception de la fumée de silice (addition ultrafine) qui se caractérise par des écarts plus significatifs variant de 0,36 à 0,76 pour les mortiers C1 et C2 avec fumée de silice ; ce qui confirme le constat fait auparavant (figure V.11).

Nous pouvons donc déduire que les facteurs d'activité des additions minérales de finesse inférieure à $8500 \text{ cm}^2/\text{g}$ sont peu influencés par le modèle de résistance adopté ; par contre les facteurs d'activité calculés pour la fumée de silice sont plus importants dans le cas du modèle de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret, dont la précision paraît plus fiable (expression parabolique).

VI. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES FACTEURS D'ACTIVITÉS

L'influence de la finesse des additions minérales sur les facteurs d'activité chimique des additions a été étudiée pour les trois additions calcaires et les deux additions pouzzolanes de finesse différentes. Comme, nous avons vu que les facteurs d'activité des additions minérales de finesse inférieure à $8500 \text{ cm}^2/\text{g}$ sont peu influencés par le modèle de résistance adopté, Nous représentons uniquement sur la figure (V.13), la variation des facteurs d'activité chimique des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de résistance de Féret, en fonction de la finesse Blaine en (cm^2/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition et pour les deux ciments utilisés.

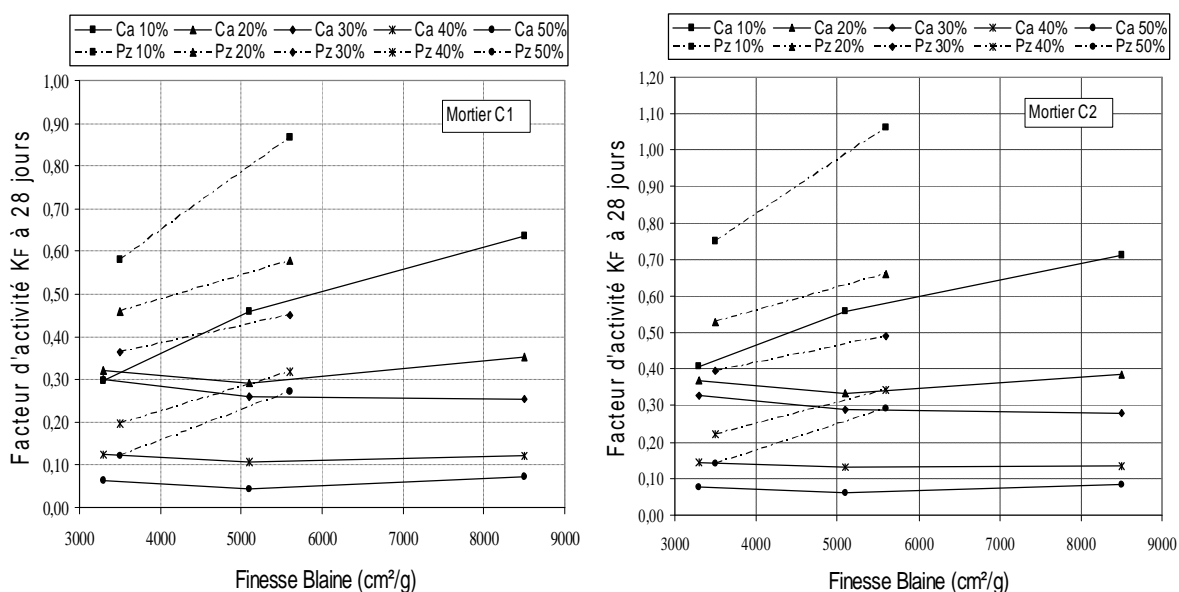


Figure V.13 : Variation des facteurs d'activité à 28 jours des additions, dans les mortiers C1 et mortiers C2, pour le modèle de résistance de Féret

Nous remarquons que la variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours est fortement influencée par la nature, la finesse et la quantité de l'addition dans le mélange. Le comportement global de ces facteurs en fonction de la finesse Blaine, est similaire pour les

deux mortiers C1 et C2 avec additions. D'une manière générale, nous pouvons noter que pour une addition donnée et une finesse donnée, le facteur d'activité de l'addition à 28 jours est toujours plus important pour le ciment C2 que pour le ciment C1.

Pour les additions calcaires, la variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours est d'autant plus importante que la finesse des particules est grande à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les autres taux de substitution, elle décroît légèrement jusqu'à une finesse de 5100 cm²/g, puis se maintient pour les finesses plus importantes. Pour les additions de pouzzolane, la variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours est plus régulière, elle est d'autant plus croissante que la finesse des particules est grande pour tous les taux de substitution du ciment par l'addition. Le comportement des mortiers avec additions calcaires est sûrement dû à la disparition de l'effet chimique enregistré à jeunes âges et au maintien uniquement d'une activité réduite à faibles taux de substitution du ciment, qui est plus efficace pour les finesses importantes des particules. Le comportement des mortiers avec additions de pouzzolanes est sûrement dû à la meilleure déclaration de l'effet pouzzolanique de ces additions qui est encore plus favorisé pour les finesses les plus élevées.

Pour des finesses proches, les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants pour les additions de pouzzolanes que pour les additions calcaires, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la quantité des additions dans le mélange est faible et la finesse de l'addition est grande.

Nous pouvons donc déduire que les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont très influencés par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend de la quantité et de la nature de l'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, mais reste peu influencée par la nature du ciment utilisé. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, quelque soit la nature du ciment et pour les deux modèles de résistance adoptés. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est faible. Pour les additions calcaires, le comportement des additions est plus irrégulier. Une plus grande finesse des particules peut engendrer soit une diminution ou une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition. Ce comportement irrégulier est probablement dû à l'influence plus importante de la finesse des particules des additions calcaires sur le processus d'hydratation du liant.

VII. SYNTHÈSE

L'analyse de la variation des résistances en compression en fonction du taux de substitution du ciment par les additions n'indique pas la part spécifique des différents effets

produits par la présence des particules d'additions dans les mortiers (effet granulaire, effet physico-chimique et microstructural et effet chimique).

Pour distinguer l'effet physique lié au comportement granulaire des additions, indépendamment des autres effets liés au processus d'hydratation du ciment, nous avons tracé pour les mortiers avec additions, sans superplastifiants, la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, en fonction des facteurs de compacité de Féret, et de Bolomey.

L'incorporation des additions minérales dans les mortiers produit à 07 jours et 28 jours, un effet physique lié au comportement granulaire plus ou moins défavorable, associé à une activité physico-chimique et probablement chimique des additions plus ou moins forte. Ce comportement est étroitement lié à la nature de l'addition incorporée et au taux substitution du ciment. Le comportement global de la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions en fonction des facteurs de compacité de Féret et de Bolomey, est similaire pour les deux ciments utilisés, indépendamment du facteur de compacité considéré.

A 07 jours et à faibles taux de substitution du ciment, les calcites (Ca1, Ca2 et Ca3) présentent l'effet global le plus important sur les résistances en compression à 07 jours en raison d'effets physico-chimiques et chimiques significatifs (accélération de l'hydratation du ciment) associés à un effet granulaire favorable ; le comportement global des calcites est d'autant plus important que la finesse de l'addition est grande.

A 28 jours, Les additions de laitier et de fumée de silice présentent l'effet global le plus important sur les résistances en compression à 28 jours en raison de leurs activités chimiques pour tous les taux de substitution du ciment (additions du type II). A faibles taux de substitution du ciment, leurs activités chimiques favorables permettent de compenser l'effet granulaire défavorable qu'engendrent ces additions et produisent ainsi un léger gain de résistance à 28 jours.

L'activité chimique des additions à 07 jours et 28 jours pour les mortiers avec additions sans adjuvants, a été évaluée en traçant la variation du facteur d'activité en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, en utilisant la notion du liant équivalent définie par la norme EN 206-1 et en déduisant le facteur d'activité chimique à partir des modèles prédictifs de Féret et de Bolomey.

Les facteurs d'activités chimiques à 07 jours et 28 jours, des différentes additions sont très variables. Ils dépendent de l'âge du mortier avec additions, de la nature du ciment utilisé, du modèle de résistance adopté, de la nature minéralogique et chimique de la quantité et des caractéristiques granulaires de l'addition incorporée. D'une façon générale, les facteurs d'activité chimiques à 07 jours et 28 jours des différentes additions sont plus

importants pour les mortiers C2 que pour les mortiers C1. Ils sont encore plus forts dans le cas du modèle prédictif de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret.

A 07 jours, Les additions calcaires (Ca3) présentent à 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité le plus important parmi toutes les additions utilisées, en raison d'effets physico-chimiques favorables à cet âge du mortier, qui sont d'autant plus forts que la finesse de l'addition est grande.

À 28 jours, la fumée de silice présente à 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité le plus important parmi toutes les additions utilisées. Les facteurs d'activité des additions calcaires sont dans ce cas, les plus faibles en raison de l'atténuation des effets physico-chimiques qui sont d'autant plus faibles que la finesse de l'addition est petite. Les additions de laitier et de pouzzolanes présentent des facteurs d'activité intermédiaires, avec une meilleure activité pour l'addition de laitier à 20 % du taux de substitution du ciment.

Ces résultats mettent en évidence l'activité chimique des additions calcaires à 07 jours d'âge des mortiers, à l'origine de l'accélération de l'hydratation du ciment dans les mortiers avec additions calcaires à jeunes âges, qui réagissent probablement avec la phase alumineuse du ciment, cette activité est très réduite à 28 jours, mais ne disparaît pas totalement. De même, ils confirment l'activité chimique de la fumée de silice qui est capable de développer une réaction pouzzolanique en milieu riche en chaux dont l'effet est plus visible à 28 jours d'âge du mortier. Cette propriété peut aussi concerner les particules les plus fines des additions de pouzzolane. Les additions de laitier confirment leur activité chimique due aux propriétés hydrauliques latentes du laitier vitrifié moulu, qui est du même ordre à 07 jours et 28 jours.

Les facteurs d'activité évalués dans le contexte de cette étude sont très variables et dépendent de la nature de l'addition incorporée, ses caractéristiques granulaires, sa proportion dans le mélange, la nature du ciment utilisé, l'âge du mortier considéré et le modèle de résistance adopté. Toute fois, ces facteurs d'activité restent bien justifiés par la norme européenne EN 206-1 et ses applications en France. Ceci est vrai pour les deux ciments utilisés et pour les deux modèles prédictifs de résistance de Féret et de Bolomey. D'autre part, il est important de noter que le modèle de Bolomey surestime beaucoup la valeur de k pour la fumée de silice, alors que le modèle de Féret de meilleure précision (expression parabolique), engendre un coefficient k juste limite dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5).

Les valeurs préconisées par la norme européenne EN 206-1, restent justifiées jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment pour les additions calcaires, 30 % pour les additions de pouzzolane et 20 % pour les additions de laitier.

Les facteurs d'activité des additions étudiées à 28 jours sont peu à légèrement influencés par la nature du ciment ; c'est d'autant plus vrai que la quantité d'addition augmente dans le mélange.

Les facteurs d'activité à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey sont toujours plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret, quelque soit la nature du ciment utilisé. Les facteurs d'activité des additions minérales de finesse inférieure à 8500 cm²/g sont peu influencés par le modèle de résistance adopté ; par contre les facteurs d'activité calculés pour la fumée de silice sont plus importants dans le cas du modèle de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret.

Les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont très influencés par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend beaucoup de la quantité et de la nature de l'addition incorporée dans le mélange, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, quelque soit la nature du ciment et pour les deux modèles de résistance adoptés. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est faible. Pour les additions calcaires, le comportement des additions est plus irrégulier. Pour des finesse proches, les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants pour les additions de pouzzolanes que pour les additions calcaires, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la quantité des additions dans le mélange est faible et la finesse de l'addition est grande.

ACTIONS DES ADJUVANTS SUPERPLASTIFIANTS SUR LES MORTIERS AVEC ADDITIONS

I. INTRODUCTION

Nous avons vu dans les chapitres précédents, que l'incorporation des additions minérales dans les mélanges cimentaires engendrait des modifications sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires.

L'approche méthodologique utilisée pour l'étude des mortiers avec additions sans adjuvants superplastifiants a consisté en premier lieu en la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mortiers dont le volume absolu de l'ensemble des phases solides constituantes était constant et l'ouvrabilité des mélanges conservée par la correction de la quantité d'eau. Cette première phase de l'étude a permis de mettre en évidence l'effet granulaire des additions minérales et évaluer leurs effets sur le besoin en eau, la compacité, le volume d'air occlus et les résistances des mortiers à propriétés rhéologiques constantes.

Dans ce qui suit, la méthodologie précédente sera reconduite mais la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires demeurera constante pour toutes les formulations. Pour maîtriser l'effet granulaire des additions, l'ouvrabilité des mélanges sera maintenue constante par l'introduction d'adjuvants superplastifiants.

Dans ce cas :

- Le volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire dans les différents mortiers reste constant,
- La compacité du squelette granulaire à l'état frais est maintenue constante,
- La lubrification des grains solides demeure équivalente pour toutes les formulations, permettant ainsi la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire, et la limitation éventuelle de la variation du volume d'air occlus.

Pour les besoins de la phase d'étude des mortiers avec additions et superplastifiants, nous avons réalisés pour les deux ciments et les deux superplastifiants, 168 formulations. . Chaque formulation a nécessité en moyenne 03 gâchées, qui ont été testées sur la table à secousses pour mortiers pour conférer au mélange la consistance de référence.

Pour chaque formulation, nous avons confectionné 03 éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm, qui ont été testés en flexion, ce qui a entraîné 168 essais de flexion. 03 éprouvettes résultantes ont été testées en compression à 07 jours et 03 autres à 28 jours, ce qui a entraîné 336 essais de compression.

II. EFFICACITE DE L'ADJUVANT SUPERPLASTIFIANT

En premier lieu nous avons commencé par évaluer l'efficacité des adjuvants superplastifiants sur la réduction du besoin en eau et s'assurer quant à l'optimisation de leur utilisation par rapport au dosage de saturation. Cette opération est intéressante, car au-delà de ce point, il est inutile de rajouter du superplastifiant parce que la fluidité du mélange ne peut plus être améliorée et un dosage excessif risque de retarder indûment le durcissement du béton et créer un phénomène de ségrégation [69]. Nous avons donc introduit des quantités croissantes de ces superplastifiants dans les mortiers de référence C1 et C2 sans additions et nous avons évalué la quantité d'eau nécessaire pour conférer aux mortiers sans additions la consistance de référence. L'efficacité de l'adjuvant superplastifiant a été alors exprimée par la variation du rapport volumique "e/c" qui caractérise le besoin en eau des mortiers sans additions en fonction du taux d'adjuvant superplastifiant par rapport à la quantité de ciment "A/C (%)", qui caractérise le besoin en adjuvant nécessaire pour maintenir la consistance de référence.

La variation du besoin en eau des mortiers de référence C1 et C2 sans additions à même consistance en fonction de la quantité des adjuvants superplastifiants SP1 (SIKA FLUID) et SP2 (MEDAPLAST SP40), peut être représentée par la figure (VI.1).

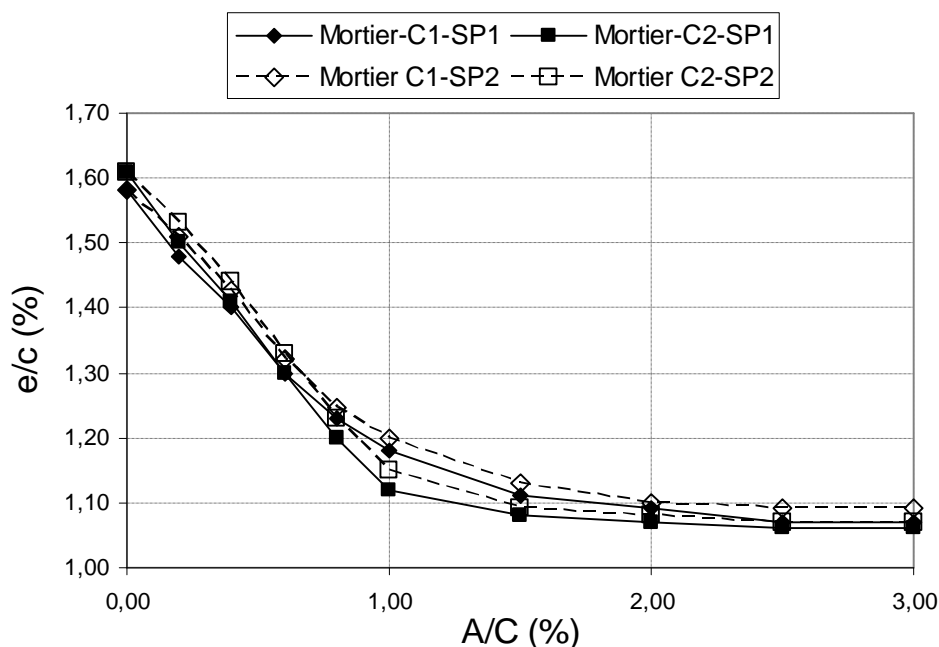


Figure VI.1 : Variation du besoin en eau des mortiers de référence C1 et C2 sans additions à même consistance en fonction de la quantité d'adjuvants superplastifiants SP1 et SP2

Nous constatons que l'introduction dans les mortiers de référence C1 et C2 sans additions des dosages croissants d'adjuvants superplastifiants, engendre en premier lieu une importante réduction du besoin en eau nécessaire à la consistance de référence. Cette réduction du besoin en eau est plus accentuée pour les mortiers C2 que pour les mortiers C1, avec les deux superplastifiants SP1 et SP2.

Pour le cas du superplastifiant SP1, la réduction du besoin en eau devient presque asymptotique à partir d'un dosage en adjuvant de 1.5 % pour le mortier C1 et 1.0 % pour le mortier C2. En effet, la réduction d'eau nécessaire pour conférer aux mortiers C1, la consistance de référence atteint 30 % pour un dosage d'adjuvant de 1.5 % et 32 % pour un dosage d'adjuvant de 3 %, alors que pour les mortiers C2, elle atteint 30 % pour un dosage d'adjuvant de 1.0 % et 34 % pour un dosage d'adjuvant de 3 %. Il en résulte donc que pour le superplastifiant SP1, le dosage de saturation est atteint à partir de 1.5 % du poids du ciment pour le mortier C1 et 1.0 % pour le mortier C2.

Pour le cas du superplastifiant SP2, la réduction d'eau nécessaire pour conférer la consistance de référence aux mortiers C1 atteint 30 % pour un dosage d'adjuvant de 2.0 % et 31 % pour un dosage d'adjuvant de 3 %, alors que pour les mortiers C2, elle atteint 32 % pour un dosage d'adjuvant de 1.5 % et 34 % pour un dosage d'adjuvant de 3 %. Il en résulte donc que pour le superplastifiant SP2, le dosage de saturation est atteint à partir de 2.0 % du poids du ciment pour le mortier C1 et 1.5 % pour le mortier C2.

Nous remarquons donc que le dosage de saturation est atteint plus vite par les mortiers C2 que pour les mortiers C1, pour les deux superplastifiants utilisés. Cette conclusion rejoint les résultats avancés par Kadri [44] qui a montré que les ciments à faible teneur en C_3A ont un effet favorable sur la diminution du dosage de saturation et sur la perte d'ouvrabilité au cours du temps.

D'autre part, nous pouvons aussi remarquer que le dosage de saturation pour le superplastifiant SP2 était plus fort que celui du superplastifiant SP1, quelque soit la nature du ciment. Ceci est confirmé par Chandra et bjornstrom [79] qui ont montré que les superplastifiants ont des effets différents sur le comportement rhéologiques des mortiers, même s'ils sont de la même famille. Ceci est dû à leur composition de synthèse qui influence leur poids moléculaire et leur configuration chimique. Kadri [44] a aussi montré que parmi trois superplastifiants considérés, le naphthalène sulfonaté était supérieur en terme de dosage de saturation et maintien de la consistance du BHP au cours du temps.

Il en résulte donc que la plage d'efficacité du superplastifiant SP1 se situe pour des dosages inférieurs à 1,5 % de la masse de ciment pour le ciment C1 et 1.0 % pour le ciment C2, alors que pour le superplastifiant SP2, elle se situe pour des dosages inférieurs à 2 % de la masse de ciment pour le ciment C1 et 1.5 % pour le ciment C2

III. CONFECTION DU MORTIER DE REFERENCE

La composition des mortiers de références sans additions a été inspirée de celle du mortier normal défini par la norme EN 196-1, en suivant les procédures décrites dans le chapitre (III), et en utilisant :

- 450 g de ciment, correspondant à un volume dans le mélange de 145.16 cm³ pour le ciment C1 et 142.86 cm³ pour le ciment C2. Ces volumes correspondent aux volumes de référence du liant avec ou sans additions.
- 1350 g de sable ordinaire (0-5), correspondant à un volume de 519.23 cm³ dans le mélange et qui est maintenu constant pour toutes les formulations avec ou sans additions.
- Comme il a été montré dans le chapitre (III), les additions étudiées pouvaient avoir sur le comportement rhéologique des mortiers frais, un effet granulaire favorable ou défavorable en fonction de la nature et de la quantité d'additions dans les mélanges cimentaires. Dans ce cas, nous avons utilisé dans le mortier de référence une quantité d'eau plus faible que celle nécessaire pour le gâchage des mortiers avec additions sans adjuvants, avec effet granulaire favorable. De cette manière, nous avons maintenu dans toutes les formulations de mortiers avec additions une quantité d'eau constante, ce qui a nécessité l'incorporation d'une certaine quantité d'adjuvant nécessaire pour acquérir la consistance de référence qui a été choisie égale à un étalement de 115±1 mm sur la table à secousses.

Les résultats obtenus pour les mortiers de référence avec adjuvants superplastifiants sont résumés dans le tableau (VI.1).

Tableau VI.1 : Résultats des mortiers de référence C1 et C2 avec superplastifiants.

Mortier	C1-SP1	C2-SP1	C1-SP1	C2-SP1
Etalement (mm)	115	115	115	115
Besoin en eau (l/m³)	230	230	230	230
Besoin en adjuvant (kg/m³)	1.71	1.08	1.89	1.31
Compacité (%)	72.54	76.17	72.28	76.02
Volume d'air occlus (l/m³)	33.92	32.12	34.16	32.50
Résistance en compression Rc₇ (MPa)	34.25	33.32	33.91	32.91
Résistance en compression Rc₂₈ (MPa)	47.82	49.53	47.05	48.84

Nous remarquons que la quantité d'adjuvant superplastifiant dans les mortiers de référence correspondant à 0.38 % et 0.24 % du poids du ciment pour les mortiers C1 et C2, respectivement, dans le cas du superplastifiant SP1 et 0.42 % et 0.29 %, respectivement, dans le cas du superplastifiant SP2, est située dans la plage d'efficacité des adjuvants

utilisés et laisse une marge aux recommandations d'utilisation de ces adjuvants définies par les fabricants qui est de 2.5 %.

Les résultats obtenus pour les deux mortiers de référence avec superplastifiants indiquent que :

- le besoin en adjuvant superplastifiant SP1 du mortier de référence C1 est supérieur de 58 % par rapport à celui du mortier de référence C2 à même consistance,
- le besoin en adjuvant superplastifiant SP2 du mortier de référence C1 est supérieur de 44 % par rapport à celui du mortier de référence à base du ciment C2 à même consistance,
- les compacités et les volumes d'air occlus des mortiers de référence à base des ciments C1 et C2, avec les adjuvants superplastifiants SP1 et SP2, sont proches,
- la résistance en compression à 07 jours du mortier de référence C1-SP1 est supérieure de 3 % par rapport à celle du mortier de référence C2-SP1,
- la résistance en compression à 07 jours du mortier de référence C1-SP2 est supérieure de 3 % par rapport à celle du mortier de référence C2-SP2,
- la résistance en compression à 28 jours du mortier de référence C1-SP1 est inférieure de 3.6 % par rapport à celle du mortier de référence C2-SP1,
- la résistance en compression à 28 jours du mortier de référence C1-SP2 est inférieure de 3.8 % par rapport à celle du mortier de référence C2-SP2,

Comme les proportions des composants solides et la consistance des mortiers avec adjuvant superplastifiant sont les mêmes que pour les deux mortiers de référence sans adjuvant, il est légitime de penser que l'introduction d'une certaine quantité d'adjuvant dans le mortier permet de réduire une certaine quantité d'eau égale à la différence des besoins en eau du mortier sans adjuvant et du mortier avec superplastifiant. La comparaison des mortiers de référence avec adjuvant superplastifiant avec les mortiers de référence sans adjuvant, permet d'évaluer donc l'action de l'adjuvant superplastifiant en tant que réducteur d'eau.

La figure (VI.2) représente les dosages en superplastifiants SP1 et SP2 introduits dans les mortiers de référence C1 et C2 pour maintenir la consistance de référence à même quantité d'eau. Nous remarquons, que la réduction du besoin en eau engendré par l'introduction de l'adjuvant superplastifiant SP1 dans les mortiers de référence est de l'ordre de 15.23 l/m³ pour 1.71 kg/m³ d'adjuvant superplastifiant dans le cas du mortier C1 et 11.88 l/m³ pour 1,08 kg/m³ d'adjuvant superplastifiant dans le cas du mortier C2. Pour l'adjuvant superplastifiant SP2, elle est de l'ordre de 15.23 l/m³ pour 1.89 kg/m³ d'adjuvant superplastifiant dans le cas du mortier C1 et 11.88 l/m³ pour 1,31 kg/m³ d'adjuvant superplastifiant dans le cas du mortier C2. Cette réduction du besoin en eau est valable pour

les mortiers de référence dans la plage d'efficacité la plus importante des adjuvants superplastifiants, pour des dosages inférieurs à 0.5 % du poids de ciment.

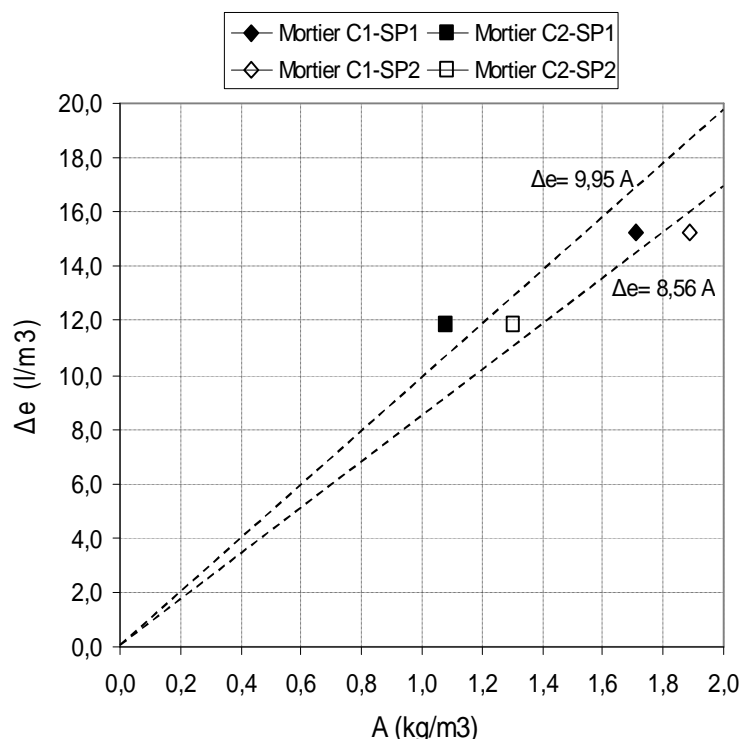


Figure VI.2 : Réduction du besoin en eau par les adjuvants superplastifiants SP1 et SP2, dans les mortiers de référence C1 et C2 sans additions à même quantité d'eau

D'autre part, nous constatons que les points expérimentaux des réductions du besoin en eau des mortiers de référence C1 et C2 se trouvent de part et d'autre de la droite d'équation " $\Delta e = 9.95.A$ " pour l'adjuvant superplastifiant SP1 et " $\Delta e = 8.56.A$ " pour l'adjuvant superplastifiant SP2. Ceci confirme que l'adjuvant superplastifiant SP1 est plus efficace que l'adjuvant superplastifiant SP2 et que la réduction du besoin en eau du mortier de référence C2 est relativement plus importante que celle du mortier C1. Il en résulte donc que l'efficacité du superplastifiant dépend de la nature du ciment. En effet ce comportement est confirmé par plusieurs auteurs. Erdogdu [78] a montré que l'effet du superplastifiant dépendait de la composition et de la quantité de ciment utilisé dans le mélange. Ismail Aiad [80] a conclu que les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment dépendaient de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant. Golaszewski et Szwabowski [82] ont montré que le type de ciment (composition minéralogique et chimique) a une grande influence sur les performances des différents superplastifiants. Néanmoins, les travaux de Bessa [7] affirment que le besoin en adjuvant des mortiers nécessaire pour s'affranchir de l'effet granulaire des additions minérales ne

dépendait pas du type de ciment. Ceci peut être expliqué par l'influence de la teneur du ciment en C_3A , car le ciment riche en C_3A , comme dans le cas de notre étude (Ciment C1), réduit l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant. En effet Dodson [60], a montré que le pourcentage de réduction d'eau diminue linéairement avec la teneur en C_3A dans le ciment, et donc, plus le ciment contient du C_3A et moins le réducteur d'eau est efficace. Ceci est expliqué par le fait qu'un certain nombre de molécules du réducteur d'eau se combinent avec le C_3A pour former des composés organo-minéraux et ne contribuent plus à la dispersion des grains de ciment.

Dans le cas de cette étude, nous avons confirmé que l'efficacité des superplastifiants est influencée par la nature du ciment. L'efficacité des superplastifiants SP1 et SP2 est meilleure pour le ciment C2, par rapport au ciment C1, riche en C_3A .

D'une manière générale, il est permis d'avancer que l'action de l'adjuvant superplastifiant sur les mortiers sans addition est essentiellement physique ; elle engendre une meilleure dispersion des particules et réduit les frottements entre les grains. Cette action des superplastifiants est expliquée par le fait que lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles viennent se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption). Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inter-particulaires de Van der Waals qui existent entre les atomes des différentes particules. Si les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient également les forces d'interactions de double couche qui apparaissent suite à la réaction acide-base entre les atomes de surface et le liquide, en augmentant les forces de répulsions entre les particules et engendrent donc des effets importants de fluidification ou d'épaississement des suspensions [65].

Cette conclusion est aussi confirmée par Prior et Adams [61], qui ont affirmé que le principal effet des adjuvants réducteur d'eau est la dispersion des grains de ciment entraînant l'augmentation de la surface disponible des grains pour l'hydratation. D'autre part, Jolicoeur et al [65], ont avancé que l'adsorption de polymères de superplastifiants chargés négativement crée une charge négative à la surface des particules qui se repoussent. Temkhajornkit et Nawa [70], ont expliqué que lorsque un superplastifiant à base de naphthalène est adsorbé à la surface des particules de ciment, il change le signe du potentiel zéta de la surface des particules qui devient négatif et en augmente la valeur absolue. Dans ce cas, les particules de ciment ayant le même signe du potentiel zéta, se repoussent électrostatiquement. Plank et Hirsch [85], ont confirmé qu'un potentiel zéta positif est nécessaire pour assurer une grande adsorption du superplastifiant.

IV. BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

La substitution du ciment par des additions minérales dans les mortiers de référence avec adjuvants superplastifiants, volume par volume en préservant la même consistance, engendre une variation du besoin en adjuvant définie par la quantité d'adjuvant A par la quantité de liant (ciment+addition) "A/L (%)" nécessaire pour conférer aux mortiers avec additions la consistance de référence, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

La quantité d'adjuvant (A en kg/m³), nécessaire pour conférer aux mortiers C1 et C2 avec additions, la consistance de référence est représentée par la figure (VI.3), en fonction du taux de substitution du ciment par les diverses additions étudiées.

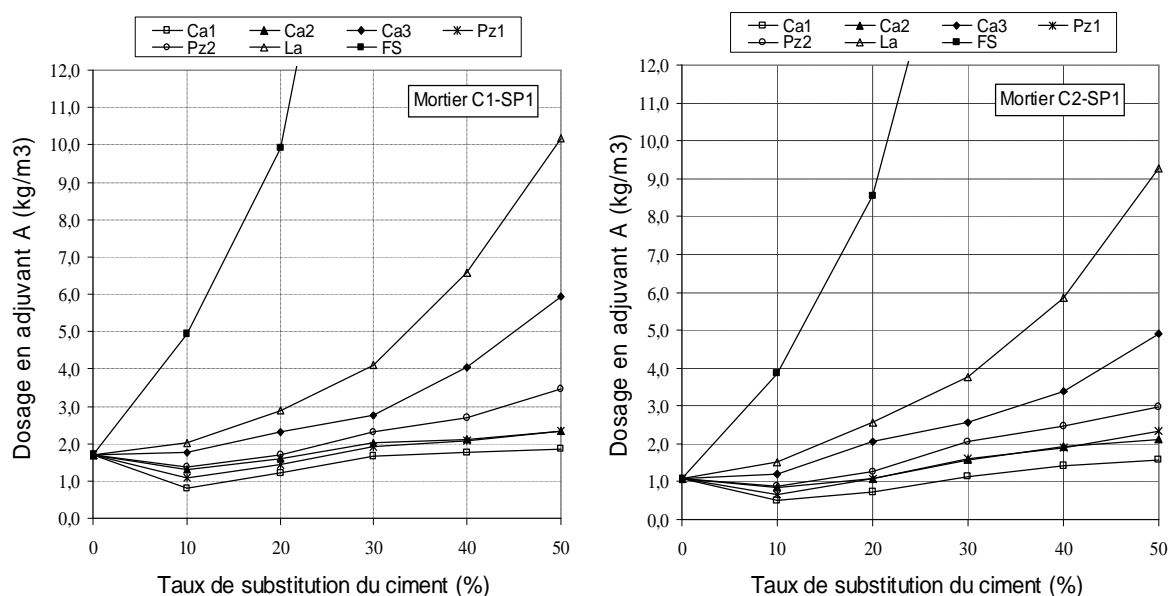


Figure VI.3 : Variation du dosage en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment

Nous pouvons constater sur la figure (VI.3), que le dosage en adjuvant SP1 est plus important pour le mortier de référence C1 que pour le mortier de référence C2. Néanmoins, nous pouvons remarquer que le ciment modifie peu les comportements rhéologiques des mortiers avec additions à l'état frais et les dosages en adjuvant superplastifiant SP1 des mortiers C2 avec additions varient de la même manière que ceux des mortiers C1 avec additions. Ainsi, le classement relatif aux dosages en adjuvant SP1 des mortiers avec les différentes additions fines et ultrafines pour les deux ciments étudiés se trouve maintenu.

Le besoin en adjuvant peut être également exprimé en taux massique par rapport à la quantité de liant (A/L en %), et est représenté pour les mortiers C1 et C2 avec additions, en fonction du taux de substitution du ciment, par la figure (VI.4).

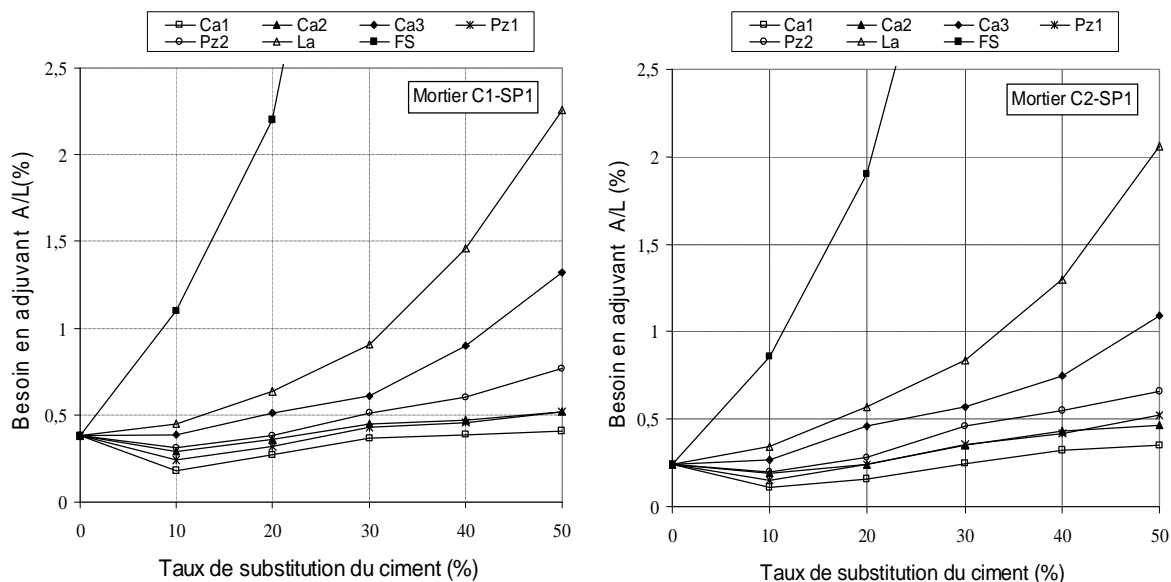


Figure VI.4 : Variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment

Nous remarquons sur la figure (VI.4), que le besoin en adjuvant des mortiers avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité d'addition incorporée dans le mélange. La variation du besoin en adjuvant suit globalement la variation du besoin en eau des mortiers avec additions sans adjuvants superplastifiants, pour les deux ciments utilisés (fig. III.2).

Les mortiers C1 et C2 avec additions calcaires et pouzzolanes (Ca1, Ca2, Pz1 et Pz2), de finesse inférieure à 5500 cm^2/g présentent un besoin en adjuvant plus faible que le mortier de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 20 %. Au-delà de 20 % du taux de substitution du ciment le besoin en adjuvant commence à croître dans des proportions modérées en étant plus important pour les additions de pouzzolanes que pour les additions calcaires de mêmes finesesses. Les mortiers C1 et C2 avec addition calcaire (Ca3) de finesse 8500 cm^2/g et additions de laitier granulé de hauts fourneaux, présentent un besoin en adjuvant qui croît avec le taux de substitution du ciment. Les mortiers C1 et C2 avec fumée de silice (addition ultrafine), présentent les besoins en adjuvant les plus importants en accord avec la grande finesse de l'addition. Ce besoin en adjuvant est d'autant plus important que la quantité de particules ultrafines dans le mélange est

importante et commence à sortir de la plage recommandée par le fabricant à partir de 20 % du taux de substitution du ciment par la fumée de silice.

La similitude de comportement entre les mortiers C1 et C2 avec additions est probablement due au fait que les deux mortiers de référence présentent le même rapport volumique ciment/solide et la même consistance, c'est-à-dire que la structure du squelette granulaire et l'intensité des frictions entre les particules restent similaires. Toute fois, les mortiers C2 présentent un besoin en adjuvant moins accentué que les mortiers C1. Ceci est justifié par le fait qu'à même consistance, la réduction du besoin en eau nécessaire pour maintenir à même quantité d'eau pour toutes les formulations, est moins importante pour les mortiers C2 que pour les mortiers C1. Cette différence de comportement est dû au fait que les mortiers C2 présentent une structure granulaire plus optimisée, ce qui se traduit par un plus faible besoin en adjuvant pour conférer aux différentes formulations la consistance de référence à même quantité d'eau.

Il en résulte donc que la diminution du besoin en adjuvant des mortiers avec additions fines à faibles taux de substitutions du ciment par rapport au mortier de référence confirme une optimisation de l'arrangement spatial des particules dans le mélange et/ou une réduction des frictions inter-particulaires. La différence de comportement pour les mortiers avec additions calcaires (Ca3) est probablement due à leur finesse qui se situe entre les additions fines et ultrafines. Le comportement particulier des mortiers avec additions de laitier granulé des hauts fourneaux de finesse 2900 cm²/g, est probablement dû à l'irrégularité des particules.

L'augmentation du besoin en adjuvant des mortiers avec additions ultrafines (fumée de silice), peut être attribuée au phénomène de floculation qui nécessite des quantités d'adjuvants plus importantes pour lubrifier l'ensemble des particules submicroniques et assurer leur dispersion dans la structure granulaire.

La distinction de comportement des additions fines et ultrafines est affirmée par plusieurs études [7, 25, 52, 53], pour les additions calcaires et la fumée de silice. Nos travaux ont permis d'élargir l'investigation aux additions fines de pouzzolanes et de laitier granulé de hauts fourneaux et de ne confirmer ces résultats que pour la fumée de silice et les additions fines calcaires et de pouzzolanes à faibles taux de substitution du ciment. En effet, Bessa [7] avait montré que les additions fines dont la dimension des particules est micronique et la surface spécifique limitée à 3.5 m²/g, permettent une diminution du besoin en adjuvant alors que les additions ultrafines augmentent le besoin en adjuvant. Cette conclusion était émise pour des taux de substitution du ciment par les additions fines allant jusqu'à 50 %, alors que dans notre étude, la conclusion sur les additions fines n'est valable qu'à faibles taux de substitution du ciment (<20%). D'autre part, il est important de noter que

les additions fines de laitier granulé de hauts fourneaux divergent de ce comportement, en raison probablement de l'irrégularité de ses particules.

L'efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP1 dans les mortiers C1 et C2 avec additions peut être analysée en considérant la relation entre la réduction du besoin en eau (Δe en l/m^3), des mortiers C1 et C2 avec additions et le dosage en adjuvant (A en kg/m^3), dans mélanges cimentaires à même consistance et à même quantité d'eau (fig. VI.5). L'efficacité de l'adjuvant a été évaluée pour des taux de substitution du ciment par les additions inférieurs à 30 % pour toutes les additions minérales sauf pour la fumée de silice pour laquelle on s'est limité à 20 %, pour rester dans la plage de recommandation des fabricants pour l'utilisation des superplastifiants.

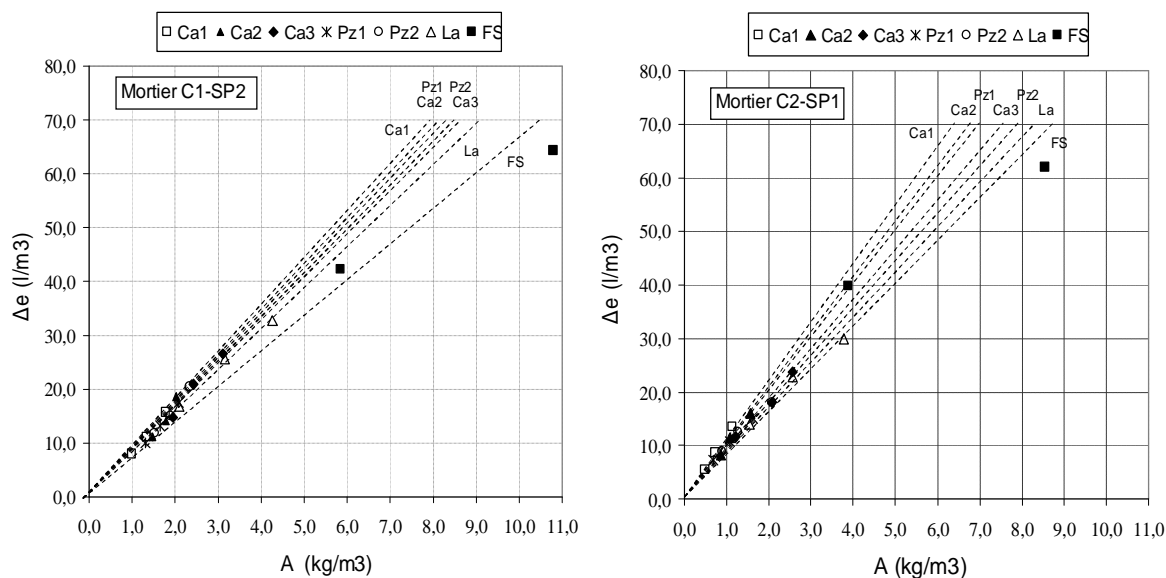


Figure VI.5 : Efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP1 dans les mortiers C1 et C2 avec additions

L'efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP1 pour les mortiers C1 et C2 peut être exprimée par les droites d'efficacité de l'adjuvant superplastifiant (Tableau VI.2).

Nous remarquons que l'efficacité de l'adjuvant SP1 dans les mortiers C1 et C2 avec additions est plus importante pour les additions calcaires (Ca) que pour les additions de pouzzolanes (Pz) de même finesse. Cette efficacité de l'adjuvant SP1 est d'autant plus réduite que la finesse des additions est grande. En raison de leur morphologie irrégulière, les additions de laitier granulé des hauts fourneaux demandent une lubrification plus importante par l'adjuvant que les additions calcaires ou de pouzzolanes de même finesse, afin d'assurer

leur dispersion dans les mélanges. En raison de sa finesse importante, la fumée de silice présente l'efficacité la plus faible pour l'adjuvant SP1.

Tableau VI.2 : Droites d'efficacité du superplastifiant SP1 pour les différents mortiers C1 et C2 avec additions

Addition	Mortier C1	Mortier C2	Mortier C1-C2
Ca1	$\Delta e = 9.9A$	$\Delta e = 11.1A$	$\Delta e = 10.5A$
Ca2	$\Delta e = 9.2A$	$\Delta e = 10.3A$	$\Delta e = 9.75A$
Ca3	$\Delta e = 8.8A$	$\Delta e = 9.3A$	$\Delta e = 9.05A$
Pz1	$\Delta e = 9.5A$	$\Delta e = 10A$	$\Delta e = 9.75A$
Pz2	$\Delta e = 9A$	$\Delta e = 9A$	$\Delta e = 9A$
La	$\Delta e = 8.3A$	$\Delta e = 8.5A$	$\Delta e = 8.4A$
FS	$\Delta e = 7.5A$	$\Delta e = 8A$	$\Delta e = 7.75A$

De même que pour les mortiers de référence, l'efficacité de l'adjuvant SP1 est plus grande pour les mortiers C2 avec additions, mais le classement relatif à l'efficacité de l'adjuvant SP1 est globalement respecté pour les deux mortiers avec additions à l'exception du cas des mortiers avec additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2) pour lesquelles l'adjuvant SP1 affiche un meilleur comportement relatif. Ceci confirme la réduction de l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant pour les mortiers C1, riche en C_3A , car l'adjuvant est adsorbé sur la surface des phases anhydres telles que C_3A et C_4AF et ainsi moins d'adjuvant reste disponible dans la solution interstitielle pour la fluidification du mélange.

D'autre part, il est important de noter que l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant dépend de l'importance du dosage en adjuvant. En effet, les mortiers avec additions (Ca), demandent des quantités d'adjuvants très réduites pour acquérir la consistance de référence, ce qui place le besoin en adjuvant dans la plage d'efficacité maximale (figure VI.1), alors que les additions de laitier et de fumée de silice demandent des quantités d'adjuvants plus importante pour acquérir la consistance de référence, ce qui place le besoin en adjuvant dans la plage d'efficacité réduite et presque asymptotique (figure VI.1).

La comparaison des droites d'efficacité enveloppe des mortiers C1 et C2 avec additions pour l'adjuvant SP1 avec la droite d'efficacité des mortiers de référence C1 et C2 (figure VI.2), montre que la présence des additions dans les mortiers réduit en général l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP1, à l'exception du mortier avec additions calcaires (Ca1) qui est caractérisée par un effet granulaire favorable à faibles taux de substitution du ciment (jusqu'à 30 %). Cette conclusion contredit quelque part Uchikawa et al [77] qui ont montré que l'ajout de superplastifiant à base de naphthalène produit une très

grande dispersion de toutes les particules de ciment dans la solution aqueuse et que les additions minérales se dispersent bien sans trop flocculer au sein de la pâte de ciment, ainsi que Kara Ali [6] qui a montré que l'effet de l'adjuvant fluidifiant sur la réduction du besoin en eau des mortiers avec additions semble que partiellement sensible à la nature minéralogique de l'addition.

V. INFLUENCE DE LA NATURE DU SUPERPLASTIFIANT SUR LE BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

Afin d'étudier l'influence de la nature du superplastifiant sur le besoin en adjuvant des mortiers avec additions, nous présentons sur la figure (VI.6) la variation du dosage en adjuvant SP2, nécessaire pour conférer aux mortiers C1 et C2 avec additions, la consistance de référence. Nous pouvons constater que le dosage en adjuvant SP2 pour les mortiers de référence C1 et C2 est plus important que celui de l'adjuvant SP1, néanmoins, la variation du dosage en adjuvant SP2 des mortiers avec additions suit globalement les mêmes variations en fonction du taux de substitution du ciment et le classement relatif aux dosages en adjuvant SP2 des mortiers avec les différentes additions fines et ultrafines pour les deux ciments étudiés se trouve maintenu.

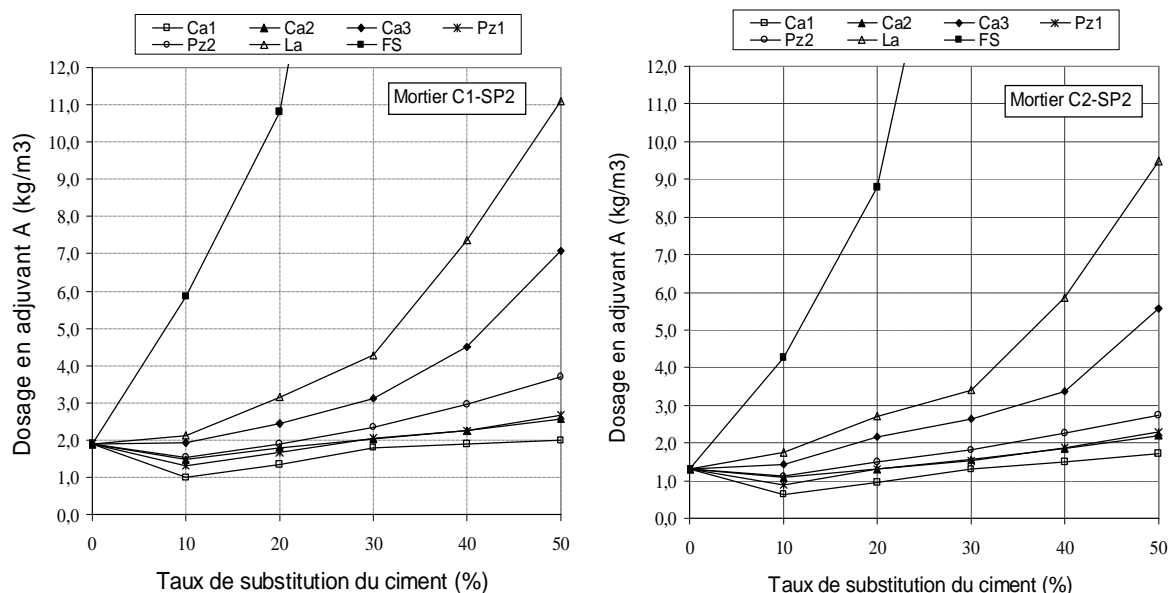


Figure VI.6 : Variation du dosage en adjuvant SP2 des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment

De même, le besoin en adjuvant des mortiers avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la

quantité d'addition incorporée (figure VI.7). La variation du besoin en adjuvant suit globalement la variation du besoin en eau des mortiers avec additions sans adjuvants superplastifiants (fig. III.2).

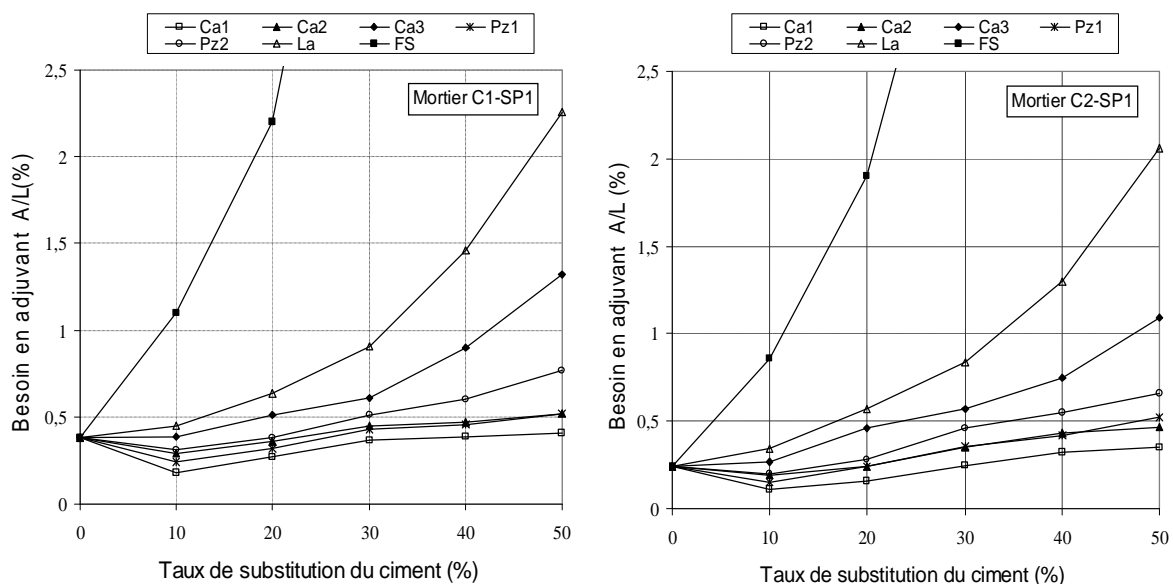


Figure VI.7 : Variation du besoin en adjuvant SP2 des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment

Pour maintenir la consistance de référence pour tous les mortiers C1 et C2 avec additions, le besoin en adjuvant SP2 est généralement plus fort qu'en adjuvant SP1. Néanmoins, le comportement des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2 est similaire à celui avec l'adjuvant SP1. Ainsi, les conclusions avancées pour le cas des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 peuvent être reconduites dans le cas du superplastifiant SP2.

La figure (VI.8) montre la corrélation entre les dosages en adjuvants SP2 et SP1 pour les mortiers C1 et C2 avec additions. Nous remarquons que la majorité des points expérimentaux du dosage en adjuvants superplastifiant tangente avec la bissectrice de la figure du côté de l'axe du dosage en adjuvant SP2, ce qui confirme que le maintien de la consistance de référence pour les mortiers avec additions nécessite une quantité d'adjuvant SP2 légèrement plus forte que pour le superplastifiant SP1.

Les points expérimentaux des mortiers C1 avec additions de fumée de silice, de laitier (40 % et 50 %) et calcaires Ca3 (50 %) s'écartent de la bissectrice en raison d'un plus fort besoin en adjuvant SP2 qu'en adjuvant SP1. Les points expérimentaux des mortiers C2 avec additions de pouzzolanes Pz2 (30 %, 40 % et 50 %) et de laitier (30 % et 40 %) sont tangents avec la bissectrice de la figure du côté de l'axe du dosage en adjuvant SP1 et les

autres points sont plus proches de la bissectrice, ce qui suggère un meilleur comportement des mortiers C2 avec additions en présence de l'adjuvant SP2.

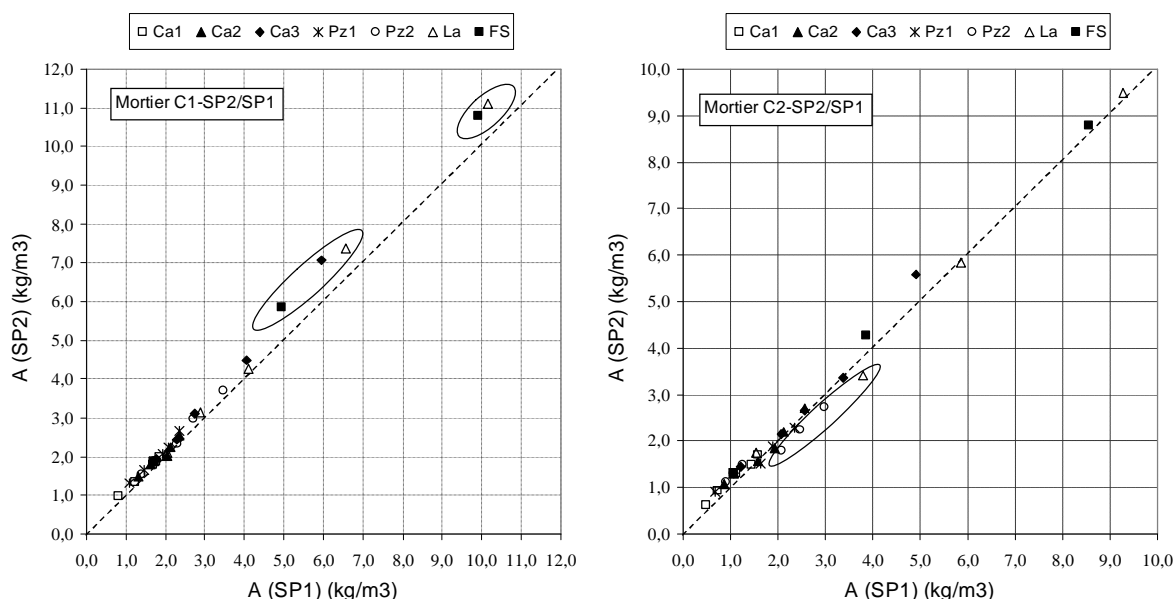


Figure VI.8 : Corrélation entre les dosages en adjuvant SP2 et SP1 des mortiers C1 et C2 avec additions à même consistance

De même que pour l'adjuvant superplastifiant SP1, L'efficacité de l'adjuvant SP2 a été évaluée pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions (fig. VI.9).

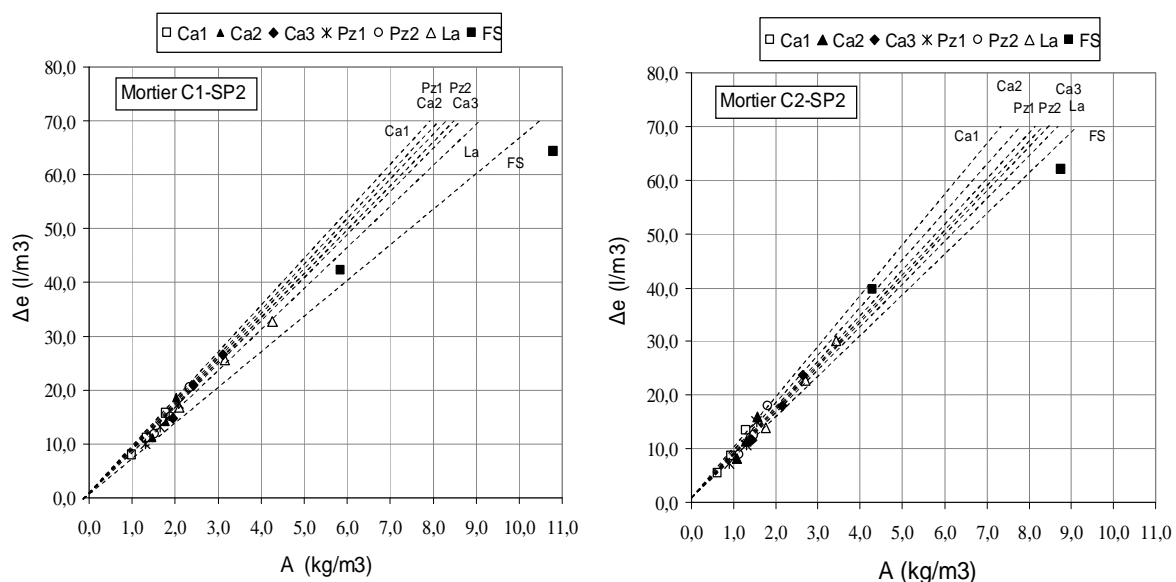


Figure VI.9 : Efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP2 dans les mortiers C1 et C2 avec additions

L'efficacité de l'adjuvant superplastifiant SP2 pour les mortiers C1 et C2 peut être exprimée par les droites d'efficacité de l'adjuvant superplastifiant (Tableau VI.3).

Tableau VI.3 : Droites d'efficacité du superplastifiant SP2 pour les différents mortiers C1 et C2 avec additions

Addition	Mortier C1	Mortier C2	Mortier C1-C2
Ca1	$\Delta e = 9.0A$	$\Delta e = 9.6A$	$\Delta e = 9.3A$
Ca2	$\Delta e = 8.6A$	$\Delta e = 9A$	$\Delta e = 8.8A$
Ca3	$\Delta e = 8.1A$	$\Delta e = 8.3A$	$\Delta e = 8.2A$
Pz1	$\Delta e = 8.4A$	$\Delta e = 8.6A$	$\Delta e = 8.5A$
Pz2	$\Delta e = 8.2A$	$\Delta e = 8.5A$	$\Delta e = 8.35A$
La	$\Delta e = 7.7A$	$\Delta e = 8.0A$	$\Delta e = 7.85A$
FS	$\Delta e = 6.7A$	$\Delta e = 7.7A$	$\Delta e = 7.4A$

Nous remarquons que le superplastifiant SP2 est moins efficace que le superplastifiant SP1 dans les mortiers C1 et C2 avec additions, mais l'ordre global d'efficacité des deux adjuvants SP2 et SP1 par rapport aux additions utilisées est globalement respecté. Ainsi, les mêmes conclusions émises pour le cas du superplastifiant SP1, peuvent être reconduites.

D'autre part, il est important de noter que l'efficacité de l'adjuvant est assez sensible à la nature de l'addition et les mortiers avec additions calcaires et de pouzzolanes sont plus sensibles à la nature du superplastifiant que les mortiers avec additions de laitier et de fumée de silice. D'autre part, la différence entre l'efficacité du superplastifiant SP1 et SP2 est d'autant plus faible que la finesse de l'addition est grande.

VI. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LE BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

L'influence de la nature du ciment sur le besoin en adjuvant des mortiers avec additions peut être analysée en représentant la corrélation entre les besoins en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions pour les deux superplastifiants SP1 et SP2 (figure VI.10).

Nous remarquons, que tous les points expérimentaux du besoin en adjuvant des mortiers avec additions se trouvent à droite de la bissectrice du côté de l'axe du dosage en adjuvant des mortiers C1 avec additions, pour les deux superplastifiant SP1 et SP2. Ceci qui confirme que les adjuvants superplastifiants utilisés sont plus efficaces dans les mortiers C2 avec additions que dans les mortiers C1 avec additions.

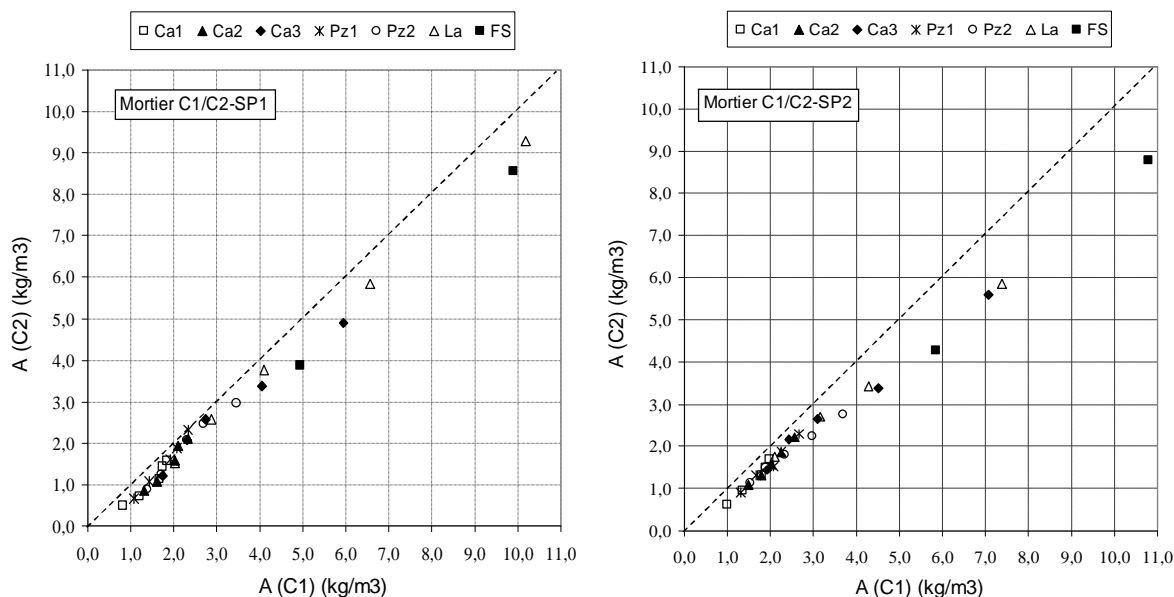


Figure VI.10 : Corrélation entre les besoins en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2

Ces points expérimentaux sont très proches de la bissectrice à faibles dosages en adjuvant, puis commencent à s'en écarter au fur et à mesure que les dosages en adjuvant augmentent. Ceci montre, qu'à forts dosages, les adjuvants superplastifiants SP1 et SP2 sont encore plus efficaces dans les mortiers C2 avec additions. Nous pouvons aussi remarquer que les points expérimentaux des dosages en adjuvant superplastifiant s'écartent plus de la bissectrice dans le cas du superplastifiant SP2 que dans le cas du superplastifiant SP1. Ceci confirme la meilleure efficacité de du superplastifiant SP1 avec les mortiers C2 avec additions qu'avec les mortiers C1 avec additions.

Les écarts entre les besoins en adjuvant dans les mortiers C1 et C2 peuvent être quantifiés en analysant la variation du dosage en adjuvants superplastifiants SP1 et SP2, notée $\Delta A(C1-C2)$, des mortiers C1 avec additions par rapport aux mortiers C2 avec additions, en fonction du taux de substitution du ciment (figure VI.11).

La variation du besoin en adjuvant des mortiers de référence C1 et C2, $\Delta A(C1-C2)$ est de l'ordre de 0.63 kg/m^3 pour le cas du superplastifiant SP1 et 0.59 kg/m^3 pour le cas du superplastifiant SP2.

En général, la variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions est plus réduite dans le cas de l'utilisation du superplastifiant SP1 que SP2, elle dépend de la nature du ciment, de la nature des additions et du taux de substitution du ciment par les additions.

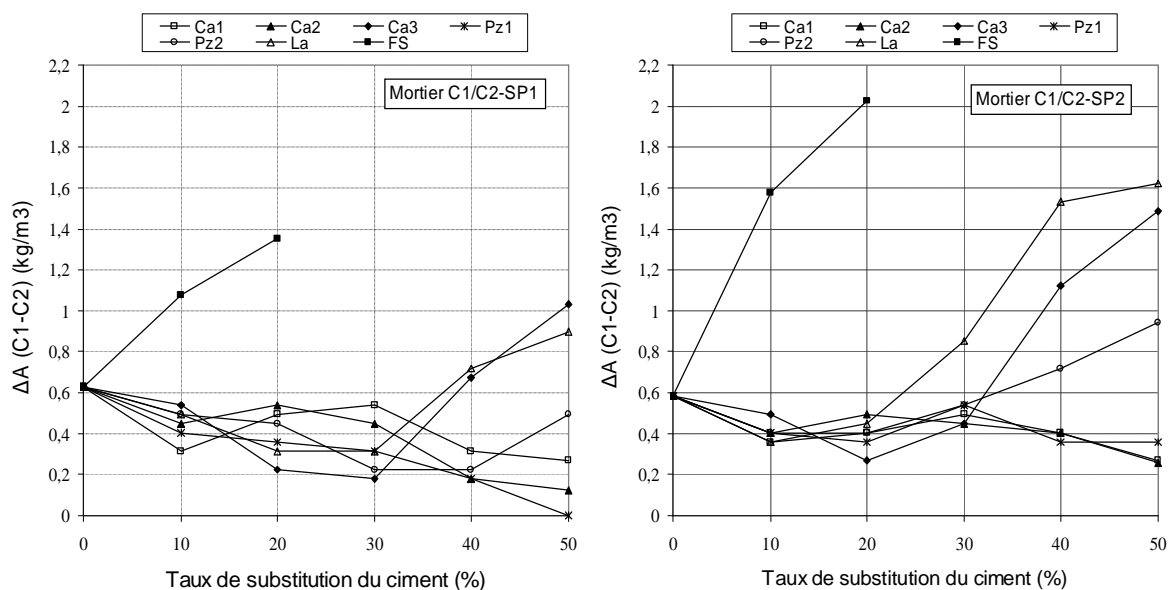


Figure VI.11 : Variation du dosage en adjuvant $\Delta A(C1-C2)$, des mortiers C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Pour les additions fines, la variation du besoin en adjuvant $\Delta A(C1-C2)$, des mortiers C1 et C2 avec additions est généralement plus faible que celle des mortiers de référence, à l'exception des mortiers avec additions calcaires (Ca3) et de laitier à forts taux de substitution du ciment ($>$ à 30 %), avec les deux superplastifiants SP1 et SP2. Les mortiers avec additions de pouzzolanes Pz2 font aussi exception à forts taux de substitution du ciment ($>$ à 30 %), dans le cas du superplastifiant SP2, en raison probablement d'un meilleur comportement des additions de pouzzolanes avec le superplastifiant SP2. Pour les additions de fumée de silice (ultrafines), la variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions est généralement plus forte que celle des mortiers de références et elle est encore plus importante dans le cas du superplastifiant SP2.

Ce comportement peut être expliqué par le fait qu'à faibles dosages en adjuvant superplastifiant, dans la plage d'efficacité optimale, la différence d'efficacité des deux adjuvants dans les mortiers de référence C1 et C2, est réduite avec la diminution de la quantité de ciment dans le mélange au profit de la quantité d'addition. Mais dans une plage d'efficacité plus réduite les dosages en adjuvants deviennent importants et les écarts sur la variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec additions augmentent aussi.

Cette analyse confirme que la nature du ciment utilisé peut influencer le besoin en adjuvant des mortiers avec additions. Cette influence de la nature du ciment est confirmée par plusieurs études [44, 60 78, 80 et 82]. Certains auteurs [44, 60].ont montré que cette la différence est essentiellement due à la différence de teneur en C_3A , comme cela a été exposé dans les paragraphes précédents. Néanmoins, ces résultats n'ont pas rejoint la

conclusion de Bessa [7] qui a avancé que le besoin en adjuvant des mortiers nécessaire pour s'affranchir de l'effet granulaire des additions minérales ne dépendait pas du type de ciment.

VII. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LE BESOIN EN ADJUVANT DES MORTIERS AVEC ADDITIONS

L'influence de la finesse des additions minérales sur le besoin en adjuvant a été étudiée pour les trois additions calcaires et les deux additions de pouzzolanes de finesse différentes en considérant la variation du besoin en adjuvant en fonction de la finesse Blaine en (cm²/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition et pour les deux ciments utilisés.

Nous remarquons sur les figures (VI.12) et (VI.13) que le besoin en adjuvant des mortiers avec additions est d'autant plus important que la finesse des particules d'additions est grande et il est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand, quelque soit les natures du ciment et du superplastifiant utilisés. Ceci peut être parfaitement expliqué par le fait que l'introduction des additions minérales de finesse plus importante que celle du ciment utilisé engendre un besoin en adjuvant plus important pour le matériau à même consistance ; ceci est d'autant plus vrai que la quantité de cette addition dans le mélange devient importante.

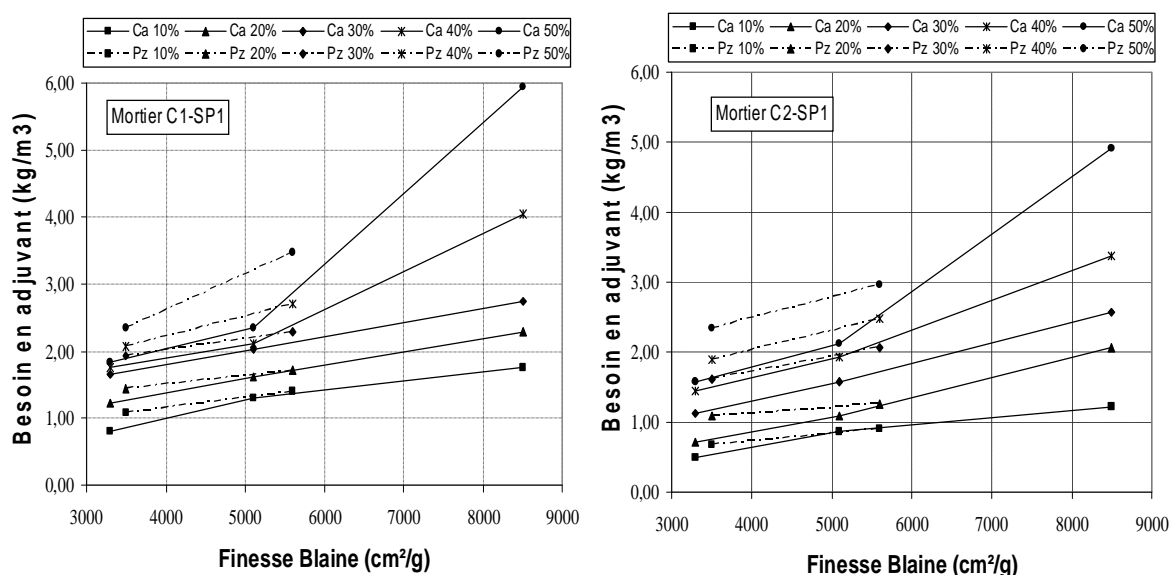


Figure VI.12 : Variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 en fonction de la finesse des additions

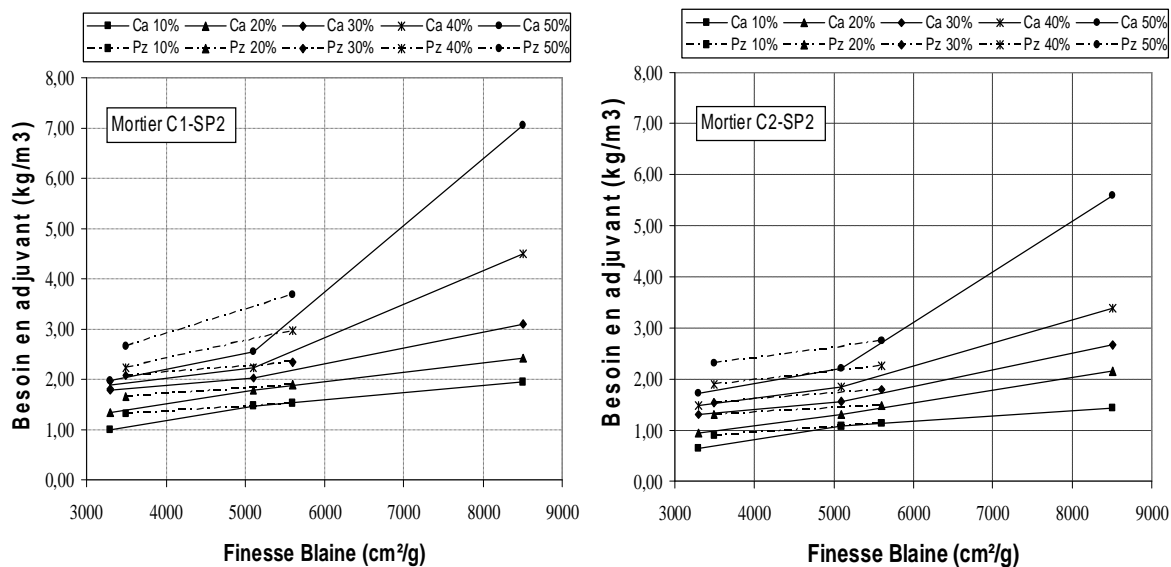


Figure VI.13 : Variation du besoin en adjuvant des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 en fonction de la finesse des additions

Pour des finesse proches, le besoin en adjuvant est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand et que la finesse de l'addition est importante. D'autre part, nous pouvons confirmer sur les figures (VI.12) et (VI.13) que les besoins en adjuvants des mortiers C1 et C2 avec additions calcaires et pouzzolanes sont plus importants avec le superplastifiant SP2 qu'avec le superplastifiant SP1. De même, les besoins en adjuvants des mortiers C1 avec additions calcaires et pouzzolanes sont plus importants que ceux des mortiers C2 avec additions pour les deux superplastifiants. Ceci est tout fait remarquable à forts dosages en superplastifiants.

Nous pouvons donc déduire que le besoin en adjuvant est beaucoup influencé par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend de la quantité et de la nature de l'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, indépendamment du type du type du ciment et de la nature du superplastifiant utilisés. Pour les deux additions considérées, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation du besoin en adjuvant des mortiers avec additions à l'état frais, quelque soit la nature du ciment.

Cette conclusion rejoint celle de Bessa [7] qui a montré que le besoin en adjuvant des mortiers avec additions minérales dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité d'addition incorporée, mais ne rejoint pas Hanna & al [76] qui ont avancé en étudiant le maintien de la maniabilité des pâtes de différents ciments contenant 1 % et 2 % de naphthalène, que plus la finesse Blaine du ciment est élevée, plus faible est l'effet fluidifiant.

VIII. SYNTHÈSE

Dans ce chapitre, l'approche méthodologique utilisée pour l'étude des mortiers avec additions sans adjuvants superplastifiants a été reconduite mais la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires a été maintenue constante pour toutes les formulations. Pour maîtriser l'effet granulaire défavorable des additions, l'ouvrabilité des mélanges a été maintenue par l'introduction d'adjuvants superplastifiants.

L'efficacité des adjuvants superplastifiants sur la réduction du besoin en eau a été évaluée en introduisant des quantités croissantes d'adjuvants superplastifiants SP1 et SP2 dans les mortiers de référence C1 et C2. La plage d'efficacité du superplastifiant SP1 se situe pour des dosages inférieurs à 1,5 % de la masse du ciment C1 et 1.0 % pour le ciment C2, alors que pour le superplastifiant SP2, elle se situe pour des dosages inférieurs à 2 % de la masse du ciment C1 et 1.5 % pour le ciment C2

La composition des mortiers de références sans additions a été inspirée de celle du mortier normal défini par la norme NF EN 196-1, en suivant les procédures décrites dans le chapitre II. Comme les additions étudiées avaient un effet granulaire favorable ou défavorable en fonction de la nature et de la quantité d'additions dans les mélanges cimentaires, nous avons utilisé dans le mortier de référence une quantité d'eau plus faible que celle nécessaire pour le gâchage des mortiers avec additions sans adjuvants, avec effet granulaire favorable. De cette manière, nous avons maintenu dans toutes les formulations de mortiers avec additions une quantité d'eau constante, ce qui a nécessité l'incorporation d'une certaine quantité d'adjuvant pour acquérir la consistance de référence. Les résultats obtenus pour les deux mortiers de référence indiquent que :

- Les besoins en adjuvants superplastifiants SP1 et SP2 du mortier de référence C1 à même consistance sont supérieurs à ceux du mortier de référence C2.
- Les résistances en compression à 07 jours des mortiers de référence C1 avec superplastifiants SP1 et SP2 sont légèrement supérieures par rapport à celles des mortiers de référence C2 avec superplastifiants SP1 et SP2.
- Les résistances en compression à 28 jours des mortiers de référence C1 avec superplastifiants SP1 et SP2 sont légèrement inférieures par rapport à celles des mortiers de référence C2 avec superplastifiants SP1 et SP2.

La comparaison des mortiers de référence avec adjuvant superplastifiant avec les mortiers de référence sans adjuvant, a permis de montrer que le superplastifiant SP1 est plus efficace que le superplastifiant SP2 et que la réduction du besoin en eau du mortier de référence C2 est relativement plus importante que celle du mortier C1. Ceci a pu être expliqué par le fait que le ciment riche en C_3A (Ciment C1), réduisait l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant.

La substitution du ciment par des additions minérales dans les mortiers de référence avec adjuvants superplastifiants, volume par volume en préservant la consistance de référence, engendre une variation du besoin en adjuvant "A (kg/m^3)" nécessaire pour conférer aux mortiers avec additions la consistance de référence. Le besoin en adjuvant des mortiers avec additions varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité de l'addition incorporée. Les variations des besoins en adjuvants superplastifiants SP1 et SP2 des mortiers C1 et C2 avaient des comportements similaires et suivaient globalement les variations des besoins en eau des mortiers avec additions sans adjuvants superplastifiants. La similitude de comportement entre les mortiers C1 et C2 avec additions est probablement due au fait que les deux mortiers de référence présentent le même rapport volumique ciment/solide et la même consistance, c'est-à-dire que la structure du squelette granulaire et l'intensité des frictions entre les particules restent similaires. Toute fois, les mortiers C2 avec additions présentent un besoin en adjuvant moins accentué que les mortiers C1. Cette différence de comportement est probablement due au fait que les mortiers C2 présentent une structure granulaire plus optimisée, ou à une meilleure efficacité des superplastifiants avec le mortier à base de ciment C2, dont la teneur en C_3A est plus faible que pour le ciment C1. La diminution du besoin en adjuvant des mortiers avec additions fines à faibles taux de substitutions du ciment par rapport au mortier de référence confirme une optimisation de l'arrangement spatial des particules dans le mélange et/ou une réduction des frictions inter particulaires. La différence de comportement pour les mortiers avec additions calcaires (Ca3) est probablement due à leur finesse intermédiaire entre les additions fines et ultrafines. Le comportement particulier des mortiers avec additions fines de laitier granulé des hauts fourneaux, est probablement dû à l'irrégularité de ses particules. L'augmentation du besoin en adjuvant des mortiers avec additions ultrafines (fumée de silice), peut être attribuée au phénomène de floculation qui nécessite des quantités d'adjuvants plus importantes pour lubrifier l'ensemble des particules submicroniques et assurer leur dispersion dans la structure granulaire.

L'efficacité des adjuvants superplastifiants SP1 et SP2 dans les mortiers C1 et C2 avec additions a été évaluée à faibles taux de substitution du ciment par les additions et a été exprimée par des droites d'efficacité. Il a été montré que l'adjuvant superplastifiant SP1 était globalement plus efficace dans les mortiers C1 et C2 avec additions que l'adjuvant superplastifiant SP2. L'efficacité des adjuvants SP1 et SP2 dans les mortiers C1 et C2 avec additions est plus importante pour les additions calcaires que pour les additions siliceuses de même finesse. Cette efficacité des adjuvants superplastifiants est d'autant plus réduite que la finesse des additions est grande. En raison de leur morphologie irrégulière, les additions de laitier granulé des hauts fourneaux demandent une lubrification plus importante par l'adjuvant que les additions calcaires ou de pouzzolanes de même finesse. En raison de sa

finesse importante, la fumée de silice présente l'efficacité la plus faible des adjuvants superplastifiants. De même que pour les mortiers de référence, l'efficacité des adjuvants SP1 est SP2 est plus grande pour les mortiers C2 avec additions que pour les mortiers C1 avec additions. D'autre part, l'efficacité des adjuvants superplastifiants dépend de l'importance du dosage en adjuvant, qu'il soit dans la plage d'efficacité maximale ou asymptotique. Enfin, il est important de noter qu'en général, la présence des additions dans les mortiers réduit en général l'efficacité des adjuvants superplastifiants.

Les adjuvants superplastifiants sont plus efficaces dans les mortiers C2 avec additions que dans les mortiers C1 avec additions. Ceci est d'autant plus vrai que la quantité d'addition dans les mélanges est grande. En général, la variation du besoin en adjuvant entre les mortiers C1 et C2 avec additions est plus réduite dans le cas du superplastifiant SP1 que SP2, elle dépend de la nature du ciment, de la nature des additions et du taux de substitution du ciment par les additions.

Le besoin en adjuvant est beaucoup influencé par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend de la quantité et de la nature de l'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, indépendamment du type du ciment et de la nature du superplastifiant utilisés. Pour les deux additions considérées, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation du besoin en adjuvant des mortiers avec additions à l'état frais, quelque soit la nature du ciment.

RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET SUPERPLASTIFIANTS

Dans la phase d'étude des mortiers avec additions et superplastifiants, la méthodologie expérimentale adoptée a permis de maintenir constants, l'effet granulaire des additions minérales, le volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire et la compacité du squelette solide des mélanges avec additions.

Pour assurer ces conditions, il a été nécessaire de procéder à la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mortiers dont le volume absolu de l'ensemble des phases solides constituantes était maintenu constant et maintenir la quantité d'eau constante pour toutes les formulations étudiées pour garantir le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais en supposant que le volume d'air occlus dans les mortiers ne varie pas significativement.

Ceci a été possible par l'utilisation d'adjuvants fluidifiants conformes à la norme NF EN 934-2. Dans ces conditions, la porosité initiale et le volume de la matrice cimentaire des mortiers restent constants indépendamment du caractère et de l'intensité de l'effet granulaire des additions.

I. RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC ADDITIONS ET SUPERPLASTIFIANTS

Les variations des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (VII.1) et (VII.2).

Nous remarquons que le mortier de référence C2-SP1 présente une résistance en compression à 07 jours plus faible que celle du mortier de référence C1-SP1 de 2.8 % ; par contre, sa résistance en compression à 28 jours est supérieure de 3 % par rapport à celle du mortier de référence C1-SP1. Ce comportement est probablement dû à la faible teneur en C_3A du ciment C2. Nous pouvons remarquer aussi, que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers avec additions minérales et superplastifiant SP1 varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) de l'addition incorporée et le taux de substitution du ciment par l'addition.

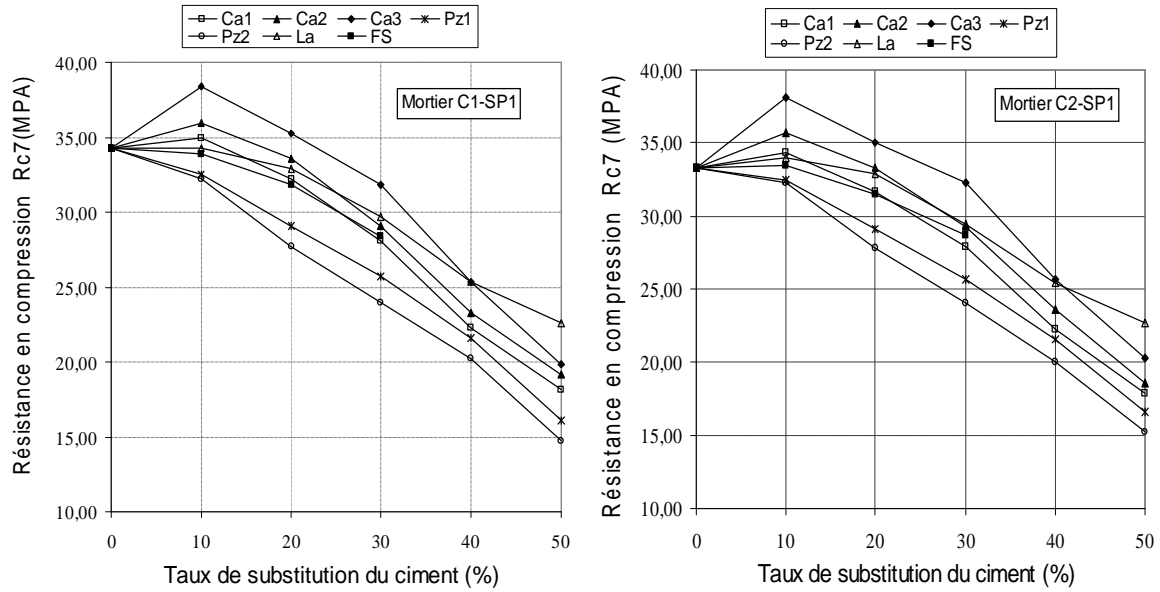


Figure VII.1 : Variation de la résistance en compression à 7 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l’addition

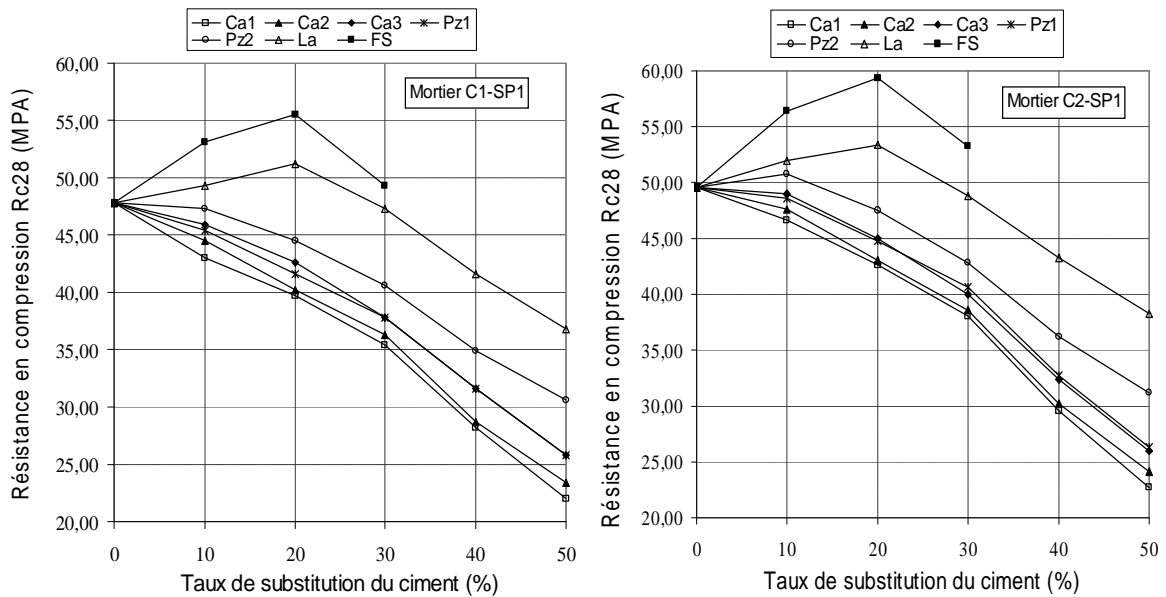


Figure VII.2 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l’addition

La variation de la résistance relative à 07 jours et 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (VII.3) et (VII.4).

Nous remarquons que les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1-SP1 avec additions calcaires (Ca1, Ca2, et Ca3), croissent pour les faibles taux de substitution du ciment et atteignent un maximum au voisinage de 10 %, puis commencent à décroître

proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les mortiers C1-SP1 avec additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2), de laitier granulé de hauts fourneaux (La) et de fumée de silice, les résistances en compression à 07 jours diminuent directement sans aucune inflexion favorable enregistrée. Cette décroissance est proportionnelle aux taux de substitution du ciment par l'addition et elle est plus accentuée pour les mortiers avec additions (Pz2).

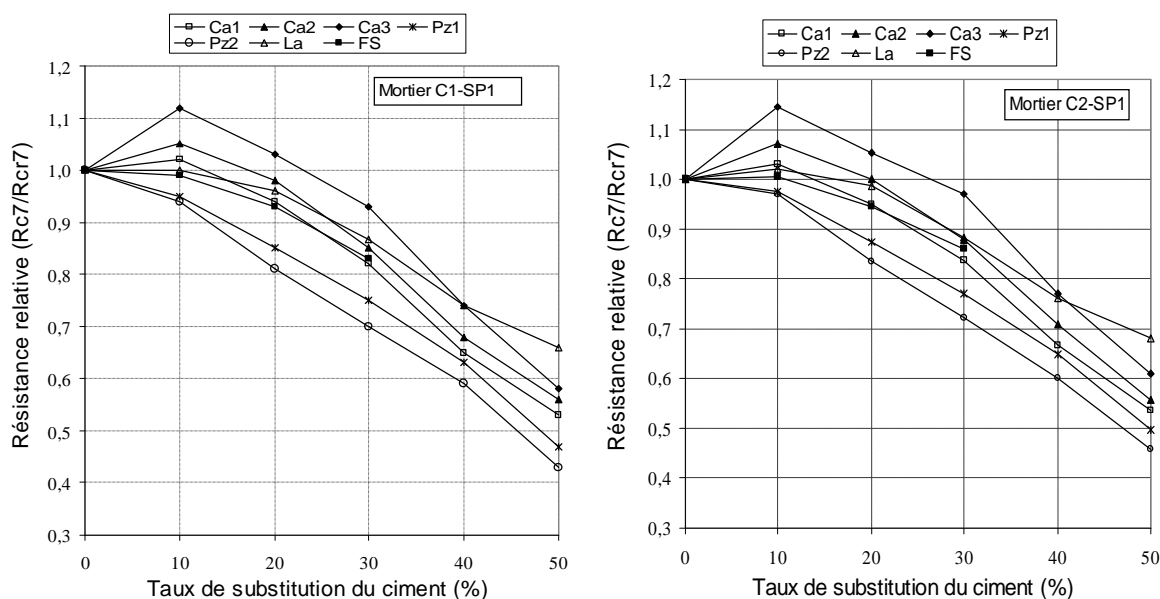


Figure VII.3 : Variation de la résistance relative à 7 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

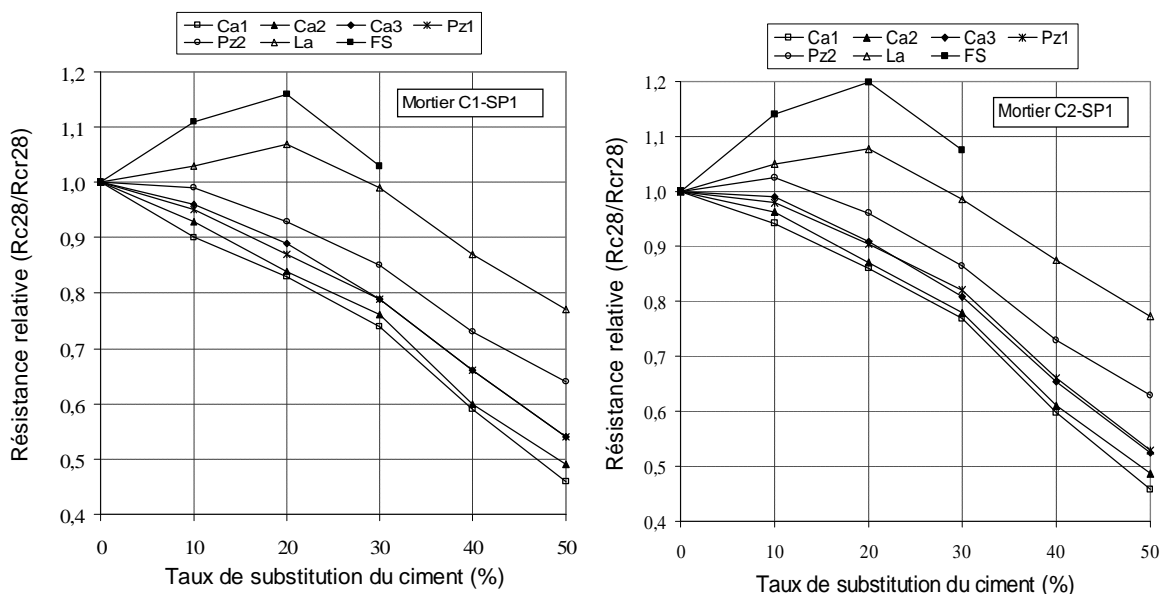


Figure VII.4 : Variation de la résistance relative à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

L'amélioration de la résistance relative à 07 jours pour les mortiers C1-SP1 avec additions calcaires, qui atteint des taux de 02, 05 et 12 % pour les mortiers avec additions (Ca1), (Ca2) et (Ca3), respectivement ne se reproduit pas pour les résistances en compression à 28 jours, qui diminuent directement sans amélioration aucune et descendent au dessous de 90 % de la résistance du mortier de référence à partir de 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les mortiers C1-SP1 avec additions de pouzzolanes, les résistances relatives à 28 jours restent décroissantes, avec un meilleur comportement que pour les résistances en compression à 07 jours. Pour les mortiers avec additions de laitier et de fumée de silice, la résistance relative croît et atteint une évolution de 07 % et 16 %, respectivement à 20 % du taux de substitution du ciment par les additions, et reste supérieure à la résistance du mortier de référence jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment pour la fumée de silice.

Le comportement des mortiers C2-SP1 avec additions calcaires (Ca1, Ca2, et Ca3), est similaire à celui des mortiers C1-SP1, mais les résistances en compression à 07 jours atteignent au voisinage de 10 % des taux légèrement plus forts de 3, 7 et 15 % pour les mortiers avec additions (Ca1), (Ca2) et (Ca3), respectivement. Les mortiers C2-SP1 avec additions de laitier, présentent une amélioration relative de 2 % de la résistance en compression à 07 jours, au voisinage de 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît de la même manière que pour les mortiers à base de ciment C1. A 28 jours, l'amélioration de la résistance en compression des mortiers C2-SP1 avec additions de laitier atteint 8 %, à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les mortiers C2-SP1 avec fumée de silice, les résistances en compression à 07 jours affichent une légère amélioration de 1 % à 10 % du taux de substitution du ciment puis décroissent de la même manière que pour les mortiers à base de ciment C1. La résistance en compression à 28 jours des les mortiers C2-SP1 avec fumée de silice reste toujours supérieure à la résistance du mortier de référence jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment par l'addition en atteignant une amélioration de 20 % à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Les mortiers C2-SP1 avec additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2), présentent un meilleur comportement que dans le cas des mortiers C1-SP1, et la chute des résistances en compression à 07 jours est moins accentuée. La résistance en compression à 28 jours, affiche une amélioration relative de 3 % à 10 % du taux de substitution du ciment pour les mortiers avec additions (Pz2), mais décroît directement pour les additions (Pz1) en descendant au dessous de 90 % de la résistance du mortier de référence à partir de 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous pouvons donc déduire que de même que pour les mortiers avec additions sans superplastifiants, l'action des additions calcaires sur le ciment est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges, à faible taux de substitution

du ciment par l'addition. Cette accélération est peu influencée par la nature du ciment et elle est plus ou moins équivalente pour toutes ces additions calcaires, en étant plus prononcée pour les additions de grande finesse.

Les mortiers avec additions de pouzzolanes présentent un meilleur comportement avec le ciment C2, en raison de l'utilisation probable de la pouzzolane comme ajout dans le ciment composé C1. Les résistances en compression se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 07 jours d'âge, à cause probablement d'un effet pouzzolanique qui se déclare plus tardivement. La présence des additions de laitier granulé des hauts fourneaux dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment (<20 %) maintient la résistance en compression à 07 jours jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment et procure un gain de résistance intéressant à 28 jours avec un meilleur comportement des mortiers C2-SP1. Le gain de résistance dans les mortiers avec additions de laitier est probablement dû aux propriétés hydrauliques latentes du laitier vitrifié moulu, classé par la norme européenne EN 206-1 comme additions du type II. L'utilisation du superplastifiant a permis de réduire la quantité d'eau dans les mortiers avec additions de laitier qui avait un effet défavorable sur l'évolution des résistances des mortiers sans superplastifiants et a permis donc l'élimination de l'effet granulaire défavorable et l'augmentation des résistances en compression pour les mortiers avec additions de laitier jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment.

L'utilisation combinée de la fumée de silice et du superplastifiant SP1 dans les mortiers C1 et C2 a permis de limiter la chute des résistances en compression à 07 jours et procurer des gains de résistance de 16 % et 20 % pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement, à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition. Ce comportement a été expliqué précédemment (chapitre IV, § II), où les grains ultrafins de la fumée de silice pénètrent entre les hydrates du ciment et les empêchent de se développer aux cours des premières étapes de l'hydratation. Le développement de l'action pouzzolanique de la fumée de silice qui est classée par la norme européenne EN 206-1 comme additions du type II, permet d'améliorer significativement la résistance par rapport au mortier de référence surtout après que l'effet granulaire défavorable ait pu être contrôlé par l'utilisation du superplastifiant.

La contribution des additions minérales à l'amélioration des résistances en compression à 07 jours et 28 jours a été expliquée ultérieurement (chapitre IV, § II). Néanmoins, l'amélioration du comportement des mortiers avec additions et superplastifiants est essentiellement due à la maîtrise de l'effet granulaire défavorable pour certaines additions [6, 7, 11, 25 et 51] et à l'amélioration du processus d'hydratation pour les autres [61-63, 68, 73, 84, 86].

En effet, Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline [68]. Une répartition

plus uniforme du ciment pourrait elle aussi contribuer à l'augmentation de la résistance, car le processus d'hydratation est amélioré [61]. Ceci est particulièrement perceptible dans les bétons à jeunes âges, mais peut se prolonger sous certaines conditions [62]. Bien que les adjuvants réducteurs d'eau influencent la vitesse d'hydratation du ciment, la nature des produits hydratés reste inchangée, de même que la structure de la pâte de ciment hydratée [63]. De Larrard [73] a montré qu'en période dormante, l'hydratation se développe plus rapidement sans pour autant provoquer des changements majeurs dans le processus d'hydratation. Corradi et al [84] ont montré qu'en raison de la meilleure adsorption de l'ettringite et de la meilleure dispersion des particules, les nouveaux superplastifiants engendrent une vitesse d'hydratation plus rapide pour les performances à jeune âge. Magratto et al [86] ont montré que la vitesse d'hydratation du ciment à jeune âge variait en fonction de sa composition chimique. Néanmoins, d'autres auteurs ont un point de vue différent. En effet, Chandra et bjornstrom [79] ont montré que l'augmentation de la fluidité des mortiers est due à l'adsorption du superplastifiant sur les particules de ciment qui retarde le processus d'hydratation du ciment. Aitcin [72] a aussi avancé que l'effet enveloppant des superplastifiants peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment quelque soit la nature du superplastifiant, le type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains. Çolak [81] a montré aussi en étudiant les caractéristiques des pâtes de ciment Portland contenant différentes quantité de pouzzolane naturelle que l'addition de 1 % de superplastifiant tend à retarder le processus d'hydratation et de prise mais les résistances en compression des mélanges à 20 % de pouzzolane et 1 % de superplastifiant sont très proches de celles des pâtes de ciment sans additions. Sakai et al [88], ont conclu que l'hydratation du ciment portland n'était pas influencée par l'addition de superplastifiants en dernier lieu, ce qui suppose que c'est en relation avec la dispersion des particules de ciment et par conséquent avec la structure des pores du matériau à l'état frais avec superplastifiants.

II. INFLUENCE DE LA NATURE DU SUPERPLASTIFIANT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION

Afin d'étudier l'influence de la nature du superplastifiant sur les résistances en compression des mortiers avec additions, nous présentons sur les figures (VII.5) et (VII.6) la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions.

Nous pouvons constater, que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers de référence C1-SP2 et C2-SP2 sont légèrement plus faibles que celles des mortiers de référence C1-SP1 et C2-SP1, néanmoins, la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions suit

globalement les mêmes variations en fonction du taux de substitution du ciment avec le superplastifiant SP1 et le classement relatif des résistances en compression des mortiers avec les différentes additions fines et ultrafines pour les deux ciments étudiés se trouve maintenu.

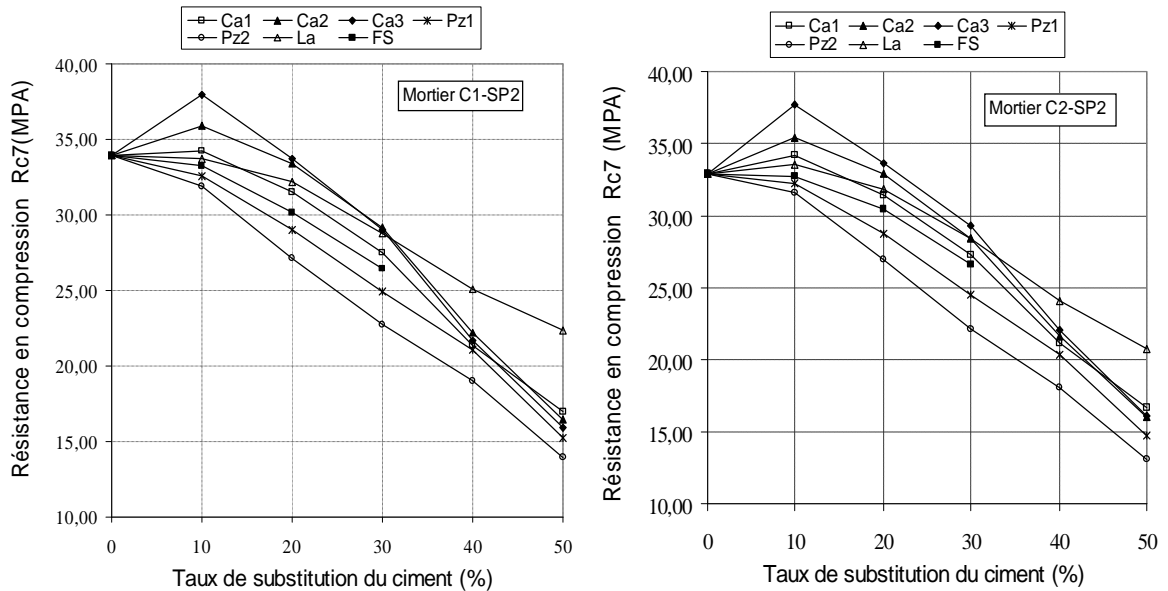


Figure VII.5 : Variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions en fonction du taux de substitution du ciment

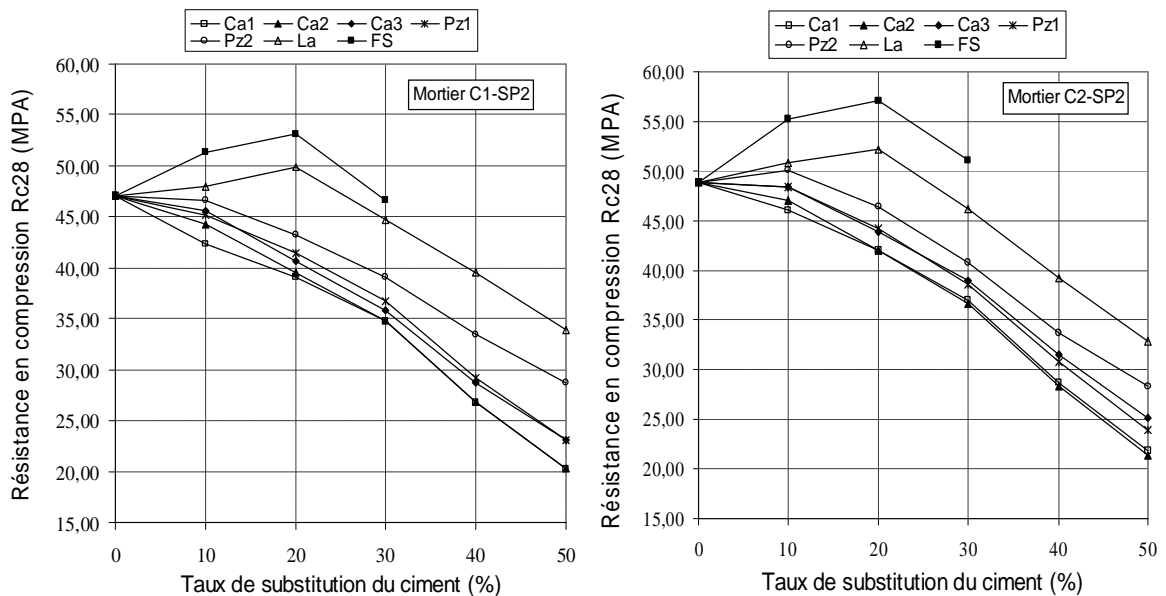


Figure VII.6 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

Nous remarquons également, que le mortier de référence C2-SP2 présente une résistance en compression à 07 jours plus faible que celle du mortier de référence C1-SP2 de 3 % ; par contre, sa résistance en compression à 28 jours est supérieure de 3.8 % par rapport à celle du mortier de référence C1-SP2. Ce comportement a été expliqué par la faible teneur en C_3A du ciment C2. Nous pouvons remarquer aussi, que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers avec additions minérales et superplastifiant SP2 varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) de l'addition incorporée et le taux de substitution du ciment par l'addition.

La variation de la résistance relative à 07 jours et 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (VII.7) et (VII.8). Nous remarquons que le comportement des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions est similaire à celui des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec additions. Néanmoins, nous pouvons constater que :

- La chute des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions est plus accentuée que dans le cas des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec additions.
- L'évolution des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions calcaires est un peu plus réduite que dans le cas des mortiers C1-SP1 et C2-SP1. L'amélioration maximale atteint 1, 6 et 12 % pour les mortiers C1-SP2 avec additions calcaires (Ca1), (Ca2) et (Ca3), respectivement et 4, 8 et 15 % pour les mortiers C2-SP2 avec additions calcaires (Ca1), (Ca2) et (Ca3), respectivement.

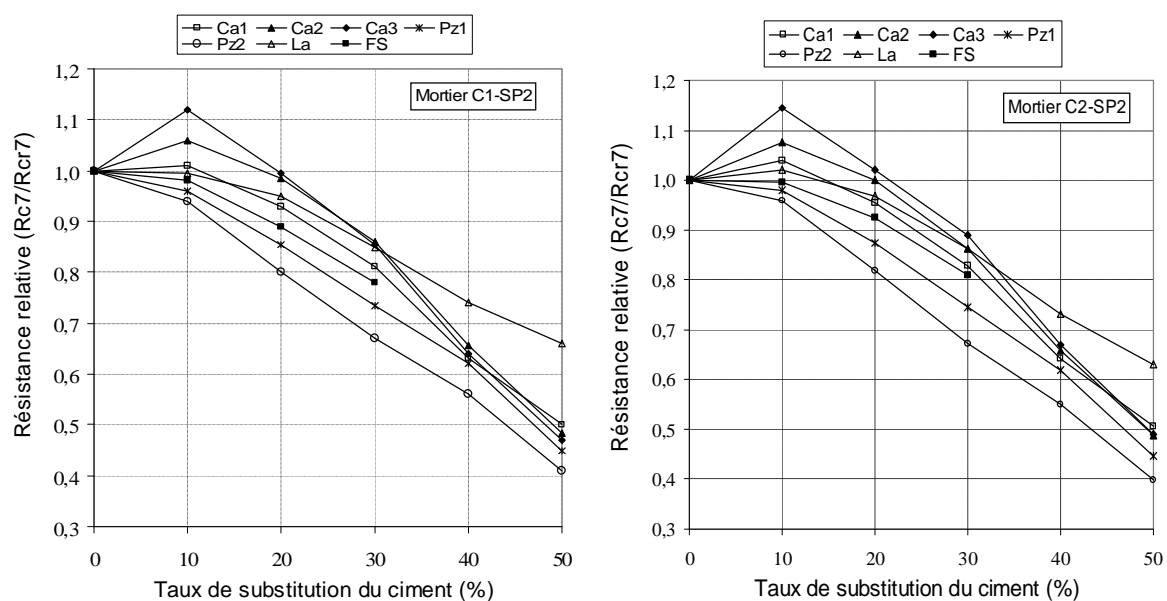


Figure VII.7 : Variation de la résistance relative à 7 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

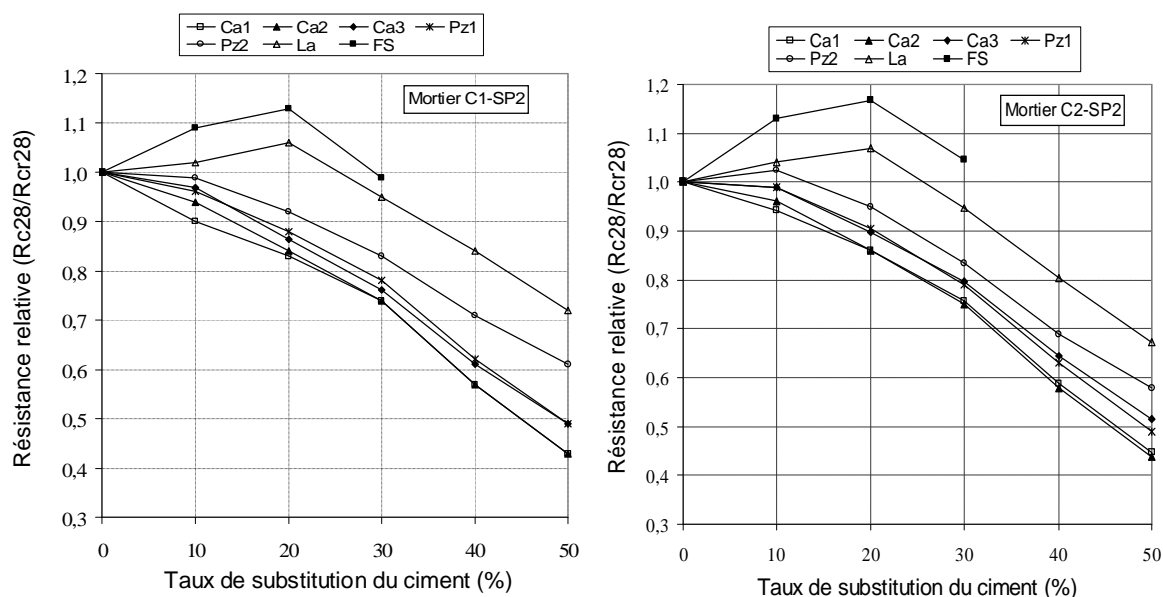


Figure VII.8: Variation de la résistance relative à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

- L'évolution des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec fumée de silice est un peu plus réduite que dans le cas des mortiers C1-SP1 et C2-SP1. L'amélioration maximale pour les mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec fumée de silice atteint 13 % et 17 %, respectivement à 20 % du taux de substitution du ciment.
- L'évolution des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions de laitier est un peu plus réduite que dans le cas des mortiers C1-SP1 et C2-SP1. L'amélioration maximale pour les mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions de laitier atteint 7 % et 6 %, respectivement à 20 % du taux de substitution du ciment.

Nous pouvons donc avancer que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions sont peu influencées par la nature du superplastifiant. En effet, les deux superplastifiants agissent de la même façon au niveau des forces de Van der Waals et de la force d'interaction de double couche [65]. Ainsi, les conclusions avancées pour le cas des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 peuvent être reconduites dans le cas du superplastifiant SP2.

Les figures (VII.9) et (VII.10), montrent la corrélation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, en fonction de la nature du superplastifiant. Nous remarquons que la majorité des points expérimentaux des résistances en compression à 07 jours et 28 jours se placent à droite de la bissectrice, du côté de l'axe des résistances des mortiers avec additions et superplastifiant SP1. Ceci montre que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec

additions, sont généralement plus importantes que celles des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions, confirmant la meilleure efficacité du superplastifiant SP1 sur les résistances en compression.

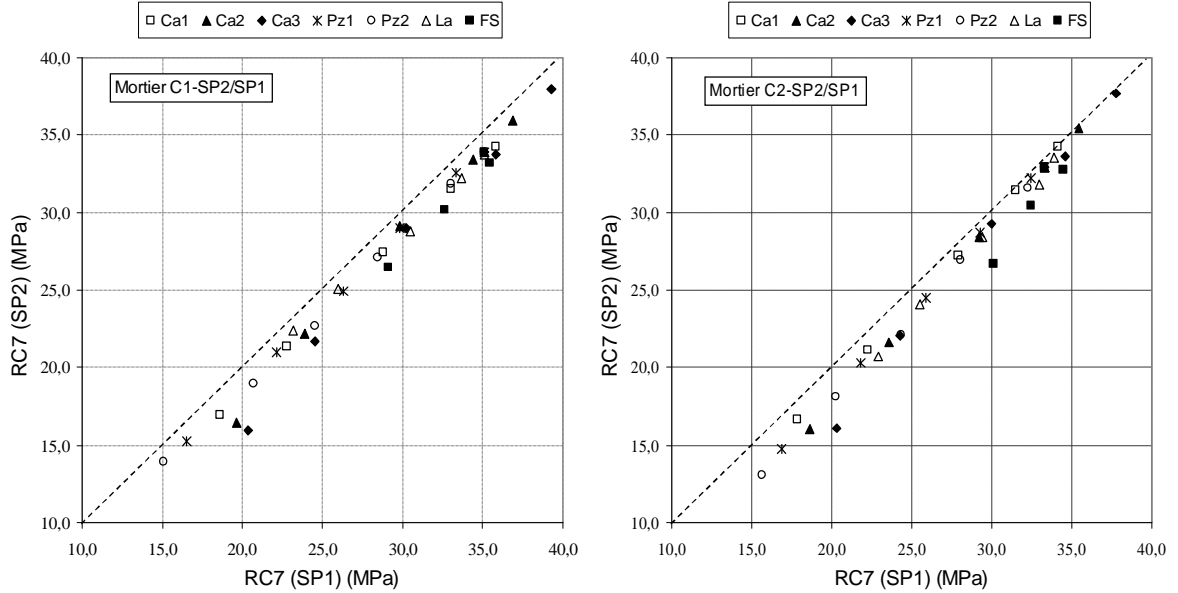


Figure VII.9 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2

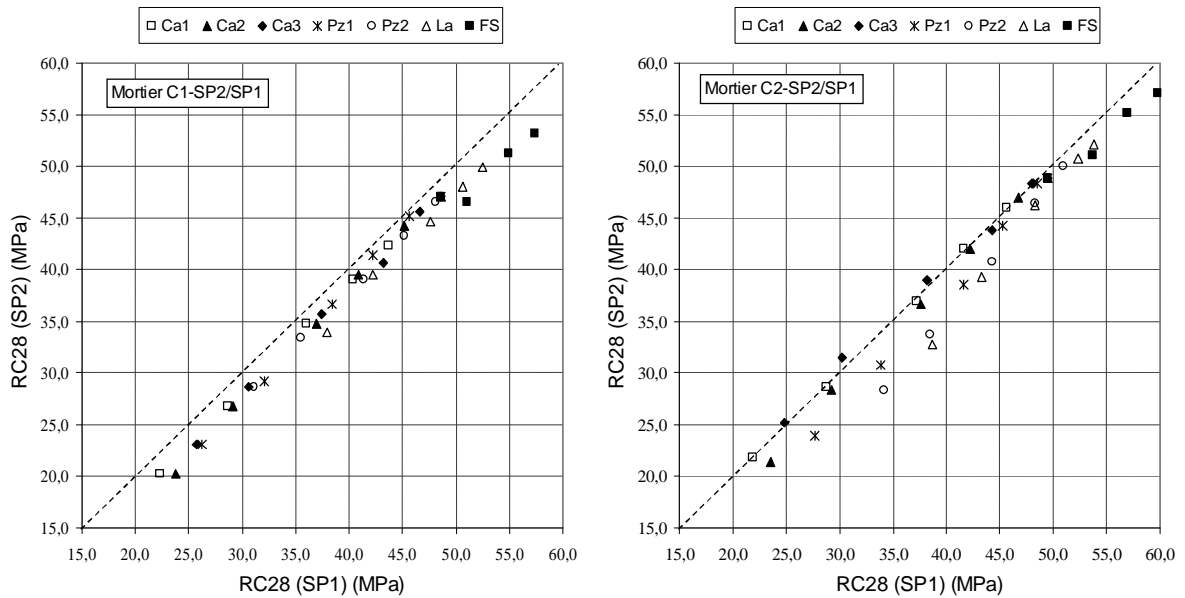


Figure VII.10 : Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2

III. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION

La corrélation des résistances en compression des mortiers C1 et C2 avec additions à 07 jours et 28 jours pour les deux superplastifiants utilisés est représentée par les figures (VII.11) et (VII.12).

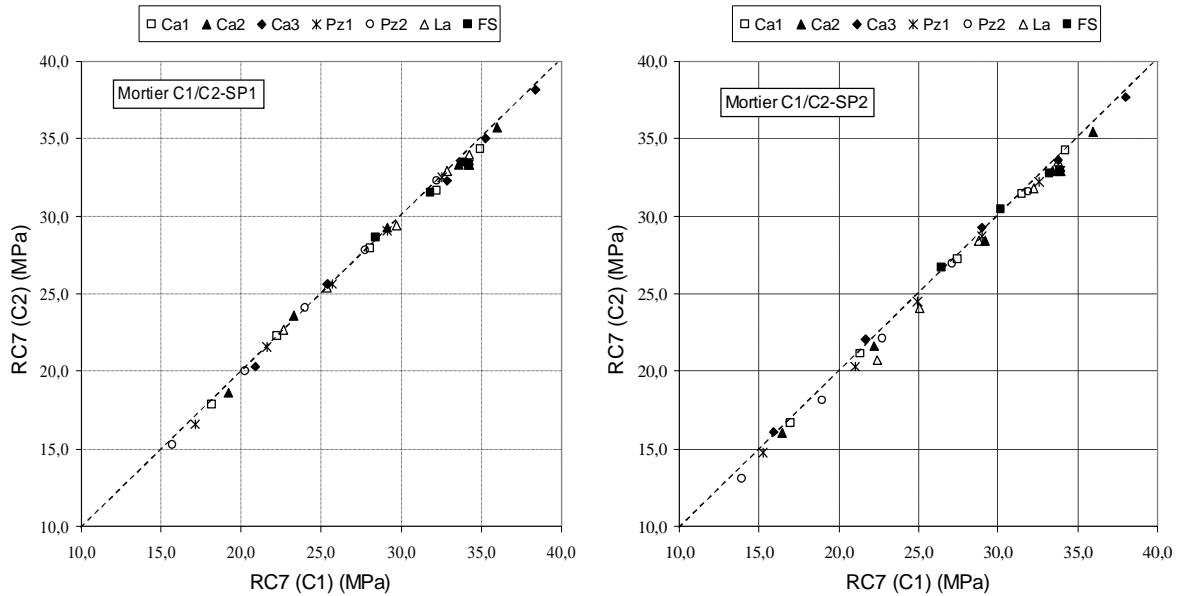


Figure VII.11 : Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2

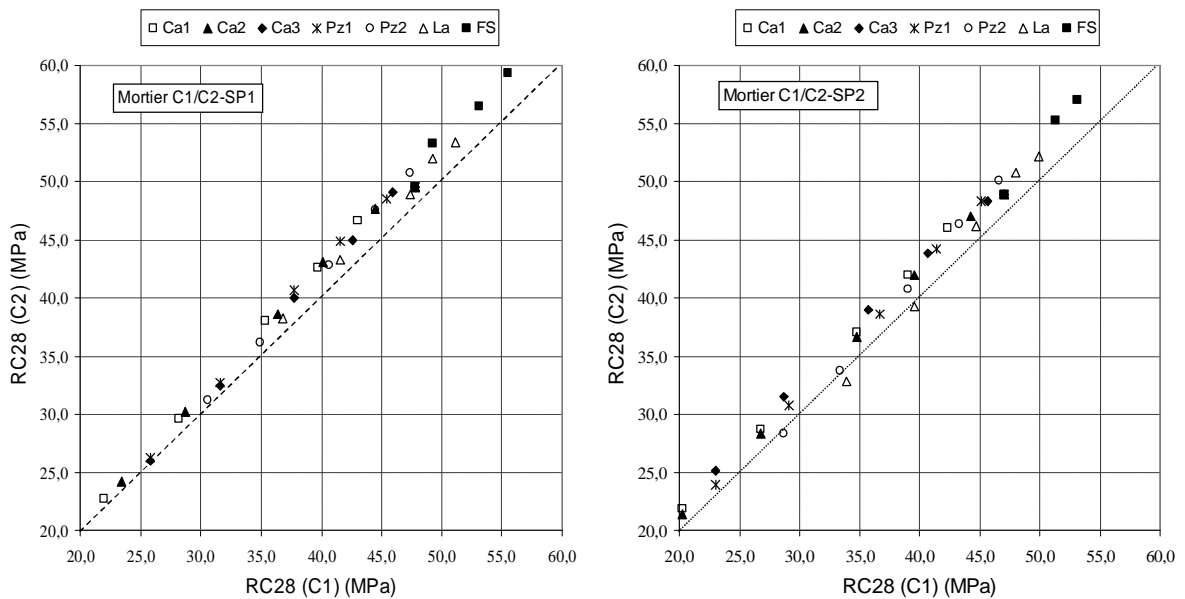


Figure VII.12: Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2

Nous pouvons constater que la majorité des points expérimentaux des résistances en compression à 07 jours est tangente à la bissectrice du côté de l'axe des résistances des mortiers C1, ce qui confirme que les résistances en compression des mortiers avec additions à 07 jours sont proches pour les deux ciments, en étant globalement légèrement plus importantes pour les mortiers C1.

La majorité des points expérimentaux des résistances en compression à 28 jours se placent à gauche de la bissectrice, du côté des mortiers C2, ce qui confirme que les résistances en compression des mortiers avec additions à 28 jours sont globalement plus importantes pour les mortiers C2 pour les deux superplastifiants utilisés. L'écart par rapport à la bissectrice est plus important pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions, mais tend à se réduire pour les forts taux de substitution. Les points expérimentaux des mortiers avec additions Pz2 (50%), La (40% et 50%) sont visibles à droite de la bissectrice, et s'écartent des commentaires avancés.

Il est donc évident que la nature du ciment peut influencer les résistances en compression des mortiers avec additions et superplastifiants. Cette influence est plus visible à 28 jours qu'à 07 jours, mais elle est aussi plus ou moins influencée par la nature et la quantité d'additions dans le mélange.

Pour quantifier cette influence, nous représentons sur les figures (VII.13) et (VII.14), les variations des résistances en compression à 07 jours et 28 jours, notées $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ et $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, respectivement en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux superplastifiants utilisés.

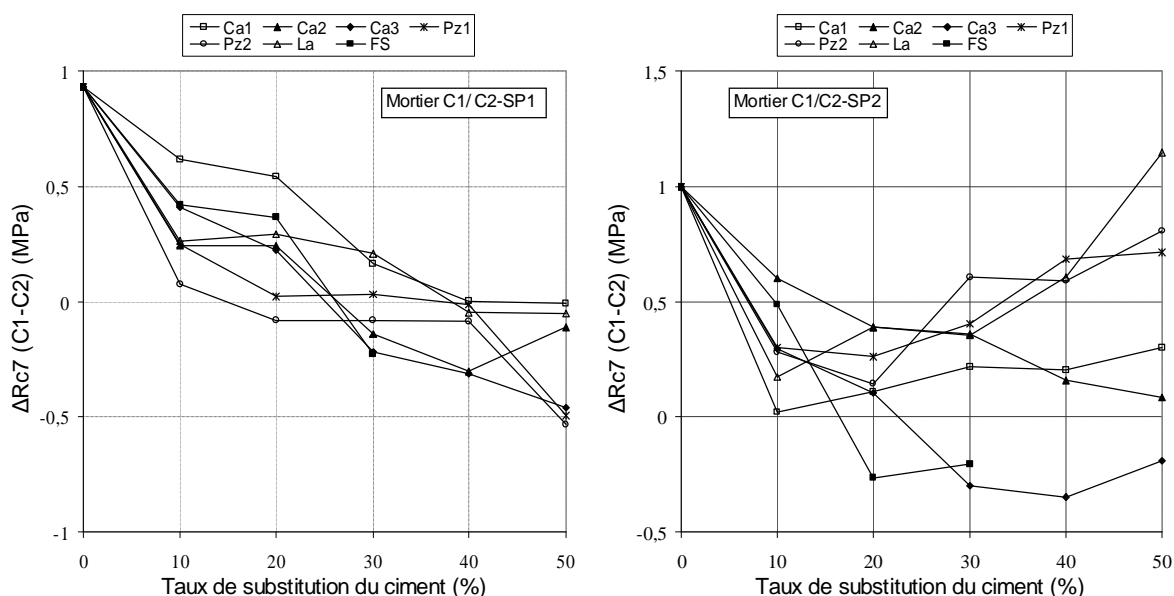


Figure VII.13: Variation de la résistance en compression à 7 jours $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ des mortiers C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

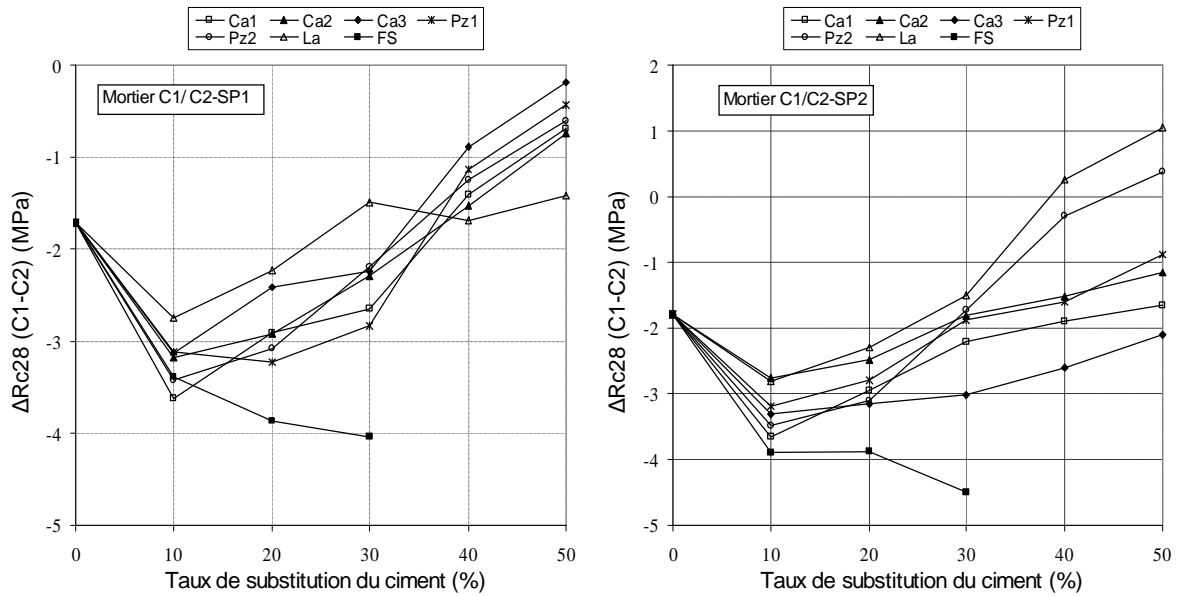


Figure VII.14: Variation de la résistance en compression à 28 jours $\Delta R_{C28}(C1-C2)$ des mortiers C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2 en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

La variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers de référence C1 et C2 est de l'ordre de 0.9 MPa avec le superplastifiant SP1 et 1.0 MPa avec le superplastifiant SP2. La variation $\Delta R_{C7}(C1-C2)$ des mortiers avec additions et superplastifiants varie entre 0.9 et -0.5 MPa, dans le cas du superplastifiant SP1 et 1.0 et -0.3 MPa, dans le cas du superplastifiant SP2.

La variation $\Delta R_{C7}(C1-C2)$, est limité dans un champs assez réduit, elle dépend essentiellement de la nature du ciment, mais dépend aussi de la nature des additions incorporée et de leurs quantités dans les mélanges cimentaires. A faibles taux de substitution du ciment par les additions, la variation $\Delta R_{C7}(C1-C2)$, est positive et décroît avec la quantité d'additions dans le mélange. Ceci montre que les résistances en compression des mortiers C1 avec superplastifiants SP1 et SP2 sont supérieures à celles des mortiers C2. A plus forts taux de substitution du ciment par les additions, la variation $\Delta R_{C7}(C1-C2)$, peut être positive ou négative, en fonction de la nature de l'addition et du superplastifiant utilisé.

La variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers de référence C1 et C2 est de l'ordre de -1.7 MPa avec le superplastifiant SP1 et -1.8 MPa avec le superplastifiant SP2. La variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$ des mortiers avec additions et superplastifiants varie entre -4.0 et -0.2 MPa, dans le cas du superplastifiant SP1 et -4.5 et 1.0 MPa, dans le cas du superplastifiant SP2.

La variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, s'étale sur un champs plus large, elle dépend essentiellement de la nature du ciment, mais dépend aussi de la nature des additions incorporée et de leurs quantités dans les mélanges cimentaires. Pour les additions fines, et à faibles taux de substitution du ciment par les additions (< 10 %), La variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, augmente en valeur absolue, puis commence à décroître avec le taux de substitution du ciment. Ceci montre que les résistances en compression des mortiers C1 avec superplastifiants SP1 et SP2 sont globalement inférieures à celles des mortiers C2 et que l'écart entre les résistance diminue avec la diminution de la quantité de ciment dans le mélange aux dépens de la quantité d'additions. Certains mortiers avec additions font exception dans le cas du superplastifiant SP2, comme le cas des mortiers avec additions Pz2 (50%), La (40% et 50%). Pour les mortiers avec fumée de silice, la variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, augmente en valeur absolue pour les deux superplastifiants utilisés avec le taux de substitution du ciment. Ceci est compréhensible à cause de l'importance que peut jouer la maîtrise de l'effet granulaire qui est défavorable pour les mortiers avec fumée de silice.

IV. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINERALES SUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION

L'influence de la finesse des additions minérales sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers avec additions calcaires et de pouzzolanes est représentée par la variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2, en fonction de la finesse Blaine en (cm²/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition (figures VII.15 et VII.16).

Le comportement des mortiers C1 et C2 avec additions calcaires et superplastifiants est différent du comportement des mortiers avec additions calcaires sans superplastifiants. Dans le cas d'utilisation des superplastifiants, le comportement des mortiers avec additions calcaires est plus régulier ; une plus grande finesse engendre une amélioration des résistances à jeunes âges par une amélioration du processus d'hydratation. Comme il a été montré dans les paragraphes précédents, la présence du superplastifiant haut réducteur d'eau dans le mélange améliore aussi le processus d'hydratation, par une répartition plus uniforme du ciment qui contribue à l'augmentation de la résistance [61]. Ceci est particulièrement perceptible dans les bétons à jeunes âges, mais peut se prolonger sous certaines conditions [62]. La vitesse d'hydratation du ciment à jeune âge varie en fonction de sa composition chimique [84].

Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse engendre une réduction des résistances à jeunes âges. Ce comportement des mortiers avec additions de pouzzolanes

est probablement du au fait que les grains plus grossiers de pouzzolane parviennent mieux à remplir les pores du squelette granulaire et à améliorer la compacité du matériau durci. Ceci a été montré pour les additions de quartz par Bessa [7].

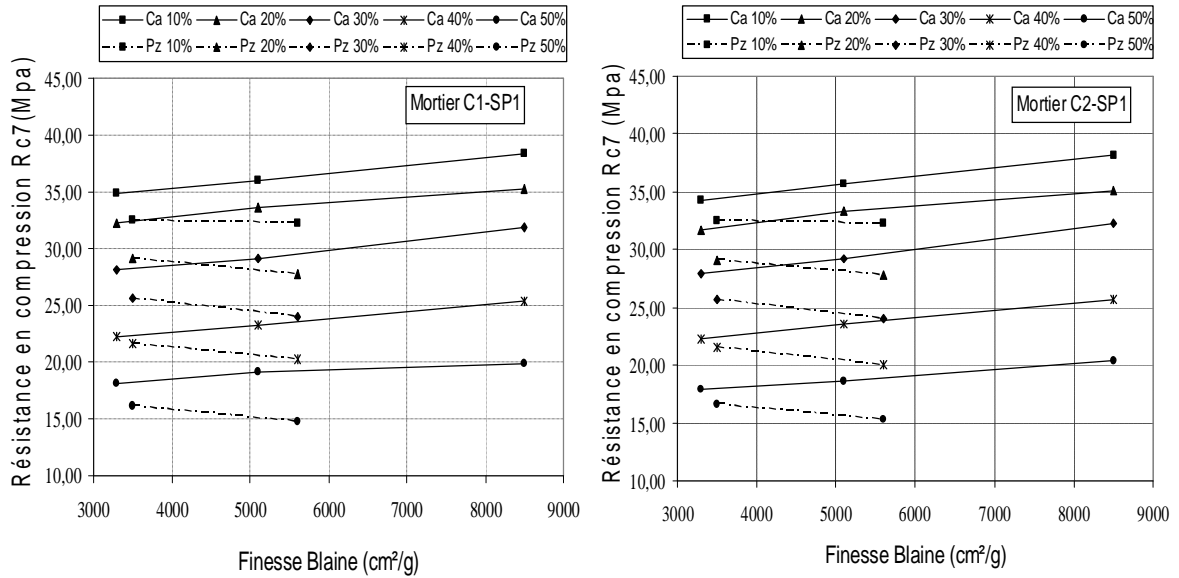


Figure VII.15 : Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 en fonction de la finesse Blaine

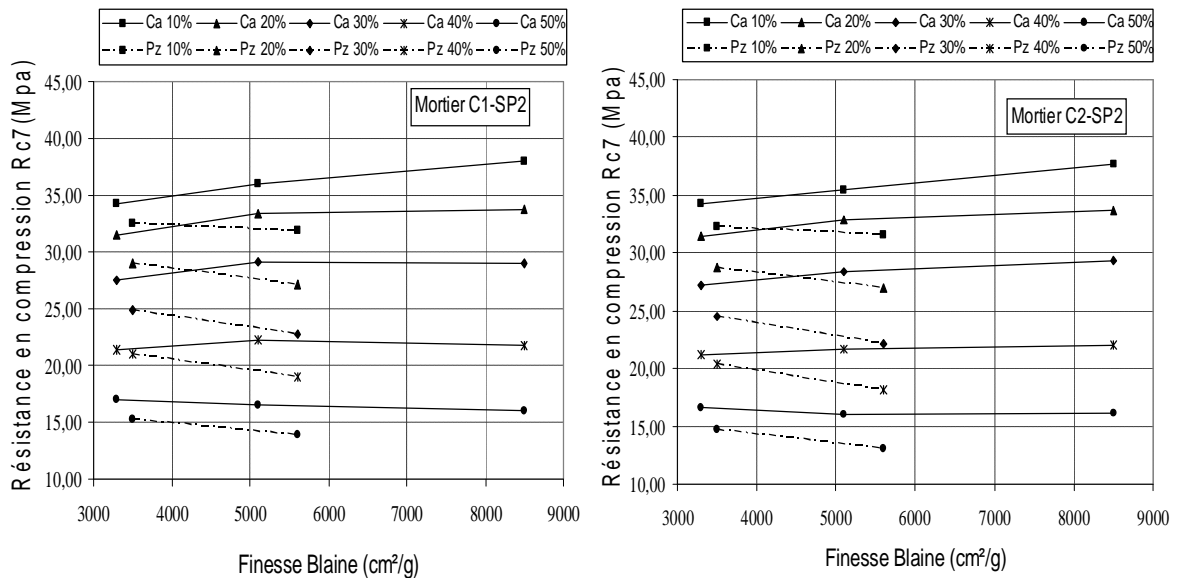


Figure VII.16 : Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 en fonction de la finesse Blaine

Pour des finesesses proches, la résistance en compression à 07 jours est plus importante pour les mortiers avec additions calcaires que pour les mortiers avec additions de

pouzzolanes, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la finesse de l'addition est grande. Ce constat confirme le rôle des additions calcaires dans l'accélération du processus d'hydratation du ciment à jeunes âges qui est d'autant plus important que la finesse de l'addition est grande.

Les figures (VII.17) et (VII.18), montrent que le comportement des résistances en compression à 28 jours en fonction de la finesse Blaine des additions calcaires et pouzzolanes est similaire pour les deux mortiers à base des ciments C1 et C2 et pour les deux superplastifiants utilisés. La variation des résistances en compression à 07 jours est fortement influencée par la finesse de l'addition et le taux de substitution du ciment par l'addition.

Pour les deux additions calcaires et pouzzolanes, les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et SP2, sont d'autant plus importantes que la finesse des particules est grande. Le comportement des mortiers avec additions calcaires est sûrement du à la maîtrise de l'effet granulaire défavorable des additions les plus fines par l'utilisation des superplastifiants SP1 et SP2, malgré la disparition de l'effet chimique enregistré à jeunes âges. Le comportement des mortiers avec additions de pouzzolanes est sûrement du à la meilleure déclaration de l'effet pouzzolanique de ces additions pour les finesesses les plus élevées, ainsi qu'à la maîtrise de l'effet granulaire défavorable, par l'utilisation des superplastifiants SP1 et SP2.

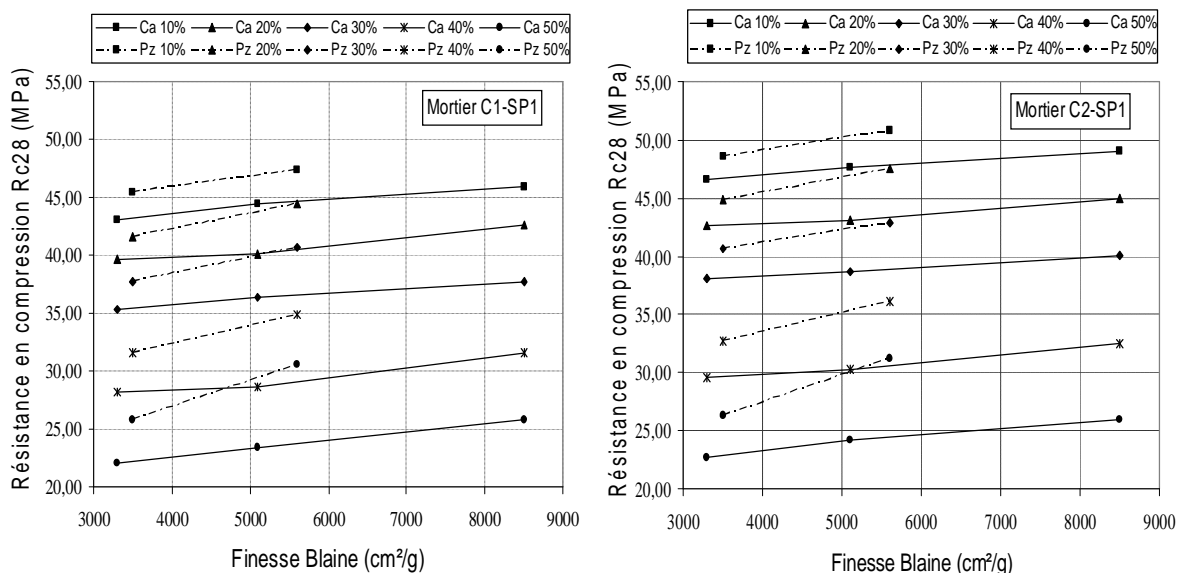


Figure VII.17 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 en fonction de la finesse Blaine

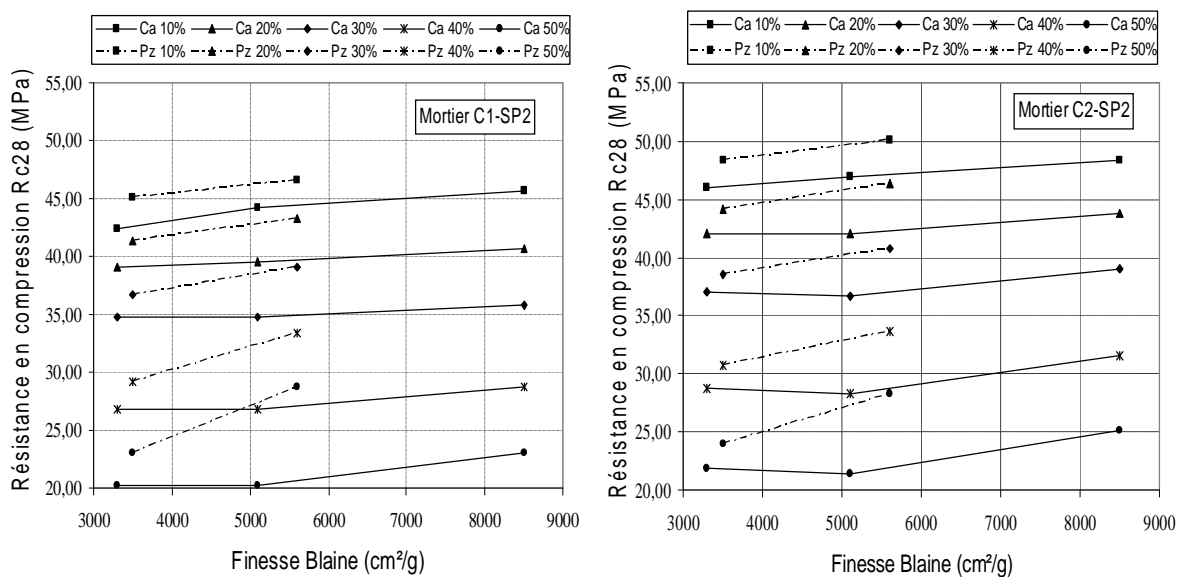


Figure VII.18 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 en fonction de la finesse Blaine

Pour des finesse proches, la résistance en compression à 28 jours est plus importante pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la finesse de l'addition est grande et que le taux de substitution du ciment par l'addition est important. Ce constat confirme la disparition de l'effet chimique des additions calcaires à 28 jours et la déclaration de l'effet pouzzolanique des additions de pouzzolanes qui est d'autant plus important que la finesse est grande.

Nous pouvons donc déduire que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers dépend beaucoup de la finesse des additions incorporée. Cette influence dépend de la nature et de la quantité d'addition incorporée dans le mélange en substitution du ciment, mais reste peu influencée par la nature du ciment et du superplastifiant. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une diminution des résistances en compression à 07 jours et une augmentation des résistances en compression à 28 jours, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est grand. Pour les additions calcaires, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Ces variations sont de mêmes natures pour tous les taux de substitution du ciment par les additions.

V. CORRELATION DES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS AVEC SUPERPLASTIFIANTS ET SANS SUPERPLASTIFIANTS

V.1 RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS

La corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants (SP) et sans superplastifiants (SSP) peut être représentée par les figures (VII.19) et (VII.20), pour les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement.

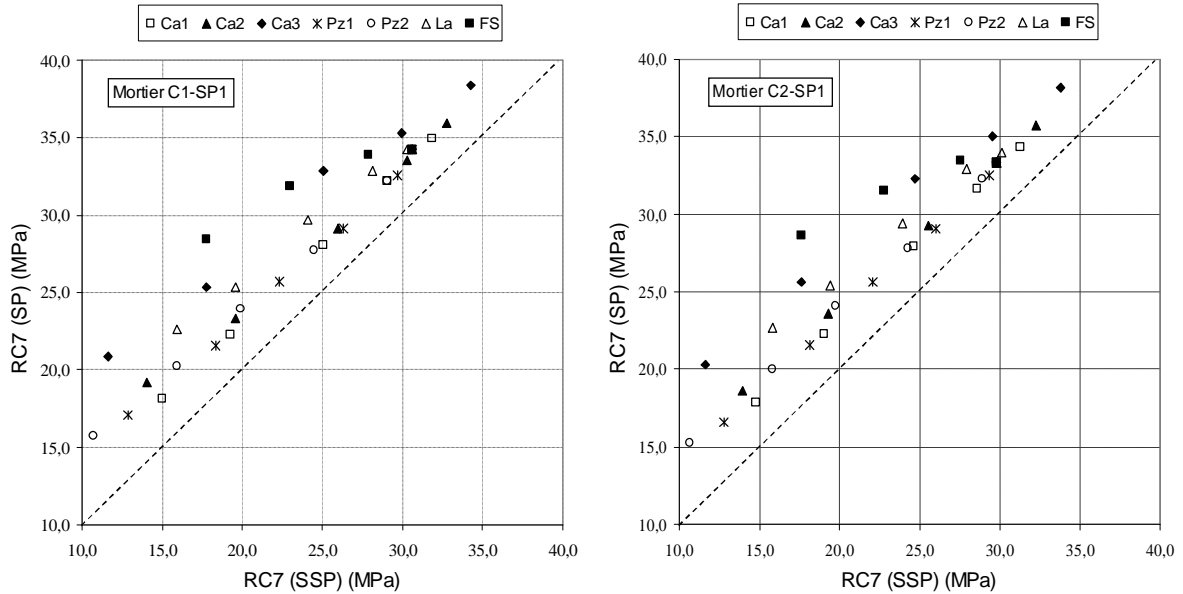


Figure VII.19: Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1

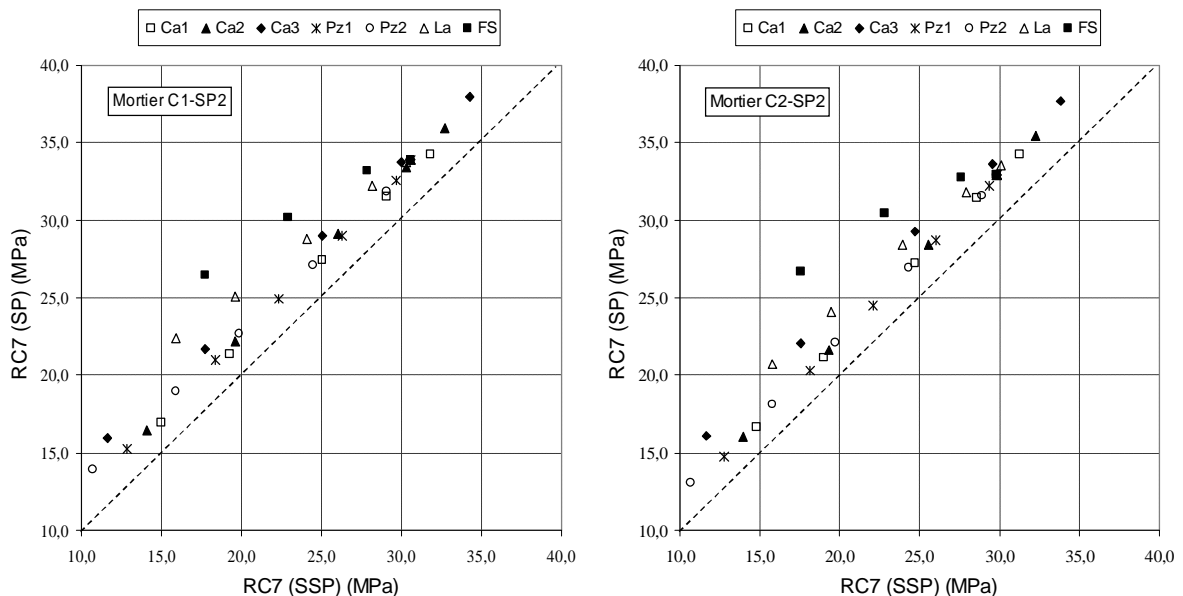


Figure VII.20: Corrélation entre les résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP2

Nous remarquons, que tous les points expérimentaux des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, se placent à gauche de la bissectrice, du côté des résistances des mortiers avec additions et superplastifiants quelque soit la nature du superplastifiant utilisé. Ceci confirme que les résistances en compression des mortiers avec additions à 07 jours sont plus importantes pour les mortiers avec additions et superplastifiants que pour les mortiers avec additions sans superplastifiants.

L'écart par rapport à la bissectrice est plus important dans le cas du superplastifiant SP1, confirmant la meilleure efficacité du superplastifiant SP1 par rapport au superplastifiant SP2.

Les points expérimentaux qui s'écartent le plus de la bissectrice sont les points des mortiers avec additions de fumée de silice, de laitier et de calcaires Ca3. Ces points correspondent aux mortiers avec additions qui sont caractérisés par des besoins en eau importants dans les mortiers avec additions sans superplastifiants, pour lesquels l'effet granulaire défavorable a été compensé par l'utilisation d'adjuvants superplastifiants. Plus la réduction du besoin en eau a été importante et plus l'écart entre les résistances en compression à 07 jours entre les mortiers avec superplastifiants et sans superplastifiants est grand. D'autre part, il est à noter que tous les points expérimentaux des mortiers avec additions se placent à gauche de la bissectrice, y compris les mortiers avec additions fines ($<5500 \text{ cm}^2/\text{g}$), à faibles taux de substitution ($<20 \%$), qui sont caractérisés par une réduction du besoin en eau et un effet granulaire favorable. Ceci est dû, à l'utilisation dans les mortiers avec additions et superplastifiants, une quantité d'eau inférieure à celle du mortier de référence sans superplastifiants, de sorte que tous les mortiers avec additions nécessitent une certaine quantité d'adjuvant superplastifiant pour maintenir la consistance de référence. Cette réduction de la quantité d'eau dans les mortiers avec additions et superplastifiants a permis un certain gain de résistance par rapport aux mortiers avec additions sans superplastifiants. L'utilisation du superplastifiant dans les mortiers avec additions a permis en premier lieu le maintien de la consistance de référence et en même temps améliorer l'hydratation du ciment par une meilleure répartition des particules, entraînant un gain de résistance complémentaire par rapport aux mortiers avec additions sans superplastifiants.

Les écarts des résistances en compression à 07 jours entre les mortiers avec superplastifiants et sans superplastifiants peuvent être évalués en analysant les variations des résistances en compression à 07 jours, notées $\Delta R_{C7}(\text{SP-SSP})$ en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés (figures VII.21 et VII.22). Nous remarquons que la variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers avec et sans superplastifiant est toujours positive, elle dépend de la nature du ciment, de la nature et de la quantité de l'addition dans les mortiers et de la nature du superplastifiant utilisé. Néanmoins, le comportement global de la variation

est assez proche pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés, indépendamment des valeurs affichées.

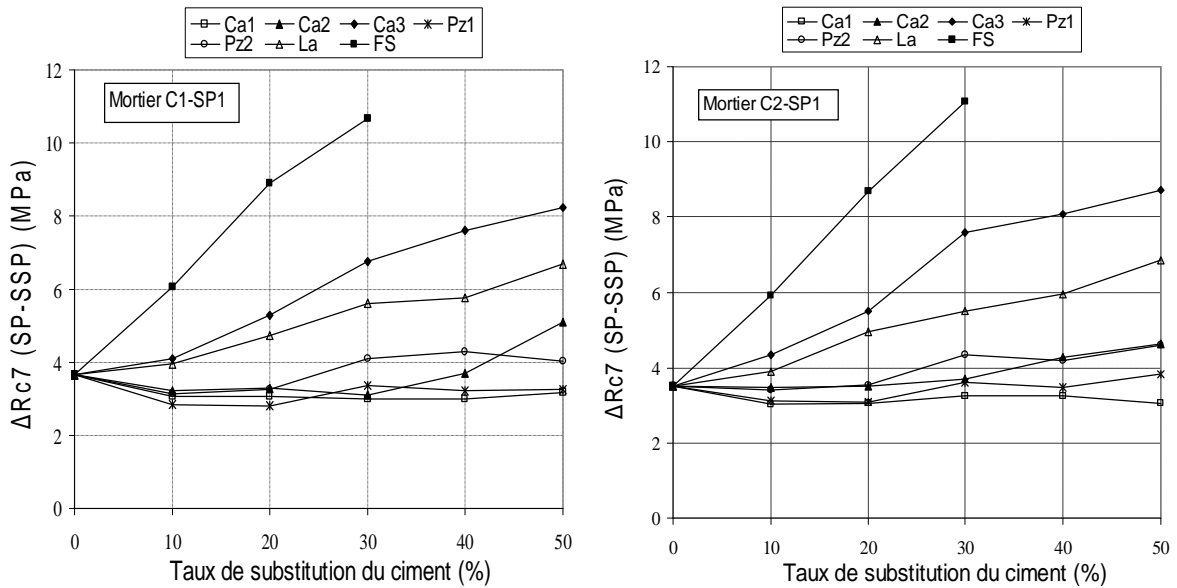


Figure VII.21: variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP1, $\Delta R_{c7}(\text{SP-SSP})$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

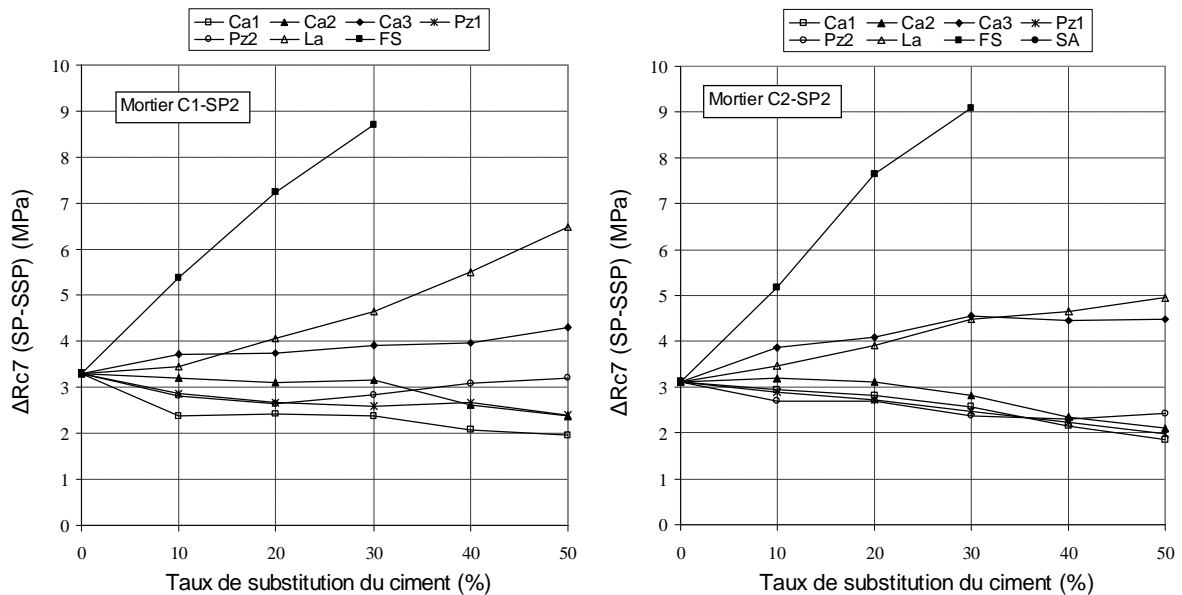


Figure VII.22: variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP2, $\Delta R_{c7}(\text{SP-SSP})$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

La variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers de références, avec et sans superplastifiants, est plus importante pour le mortier C1 que pour le mortier C2 ; elle est de l'ordre de 3.8, 3.55, 3.34, et 3.08 MPa pour les mortiers de références C1-SP1, C2-SP1, C1-SP2 et C2-SP2, respectivement. Ceci confirme une meilleure efficacité du superplastifiant SP1 par rapport au superplastifiant SP2 et la meilleure efficacité des deux superplastifiants SP1 et SP2 avec le ciment C1 pour les résistances à jeunes âges.

Pour les mortiers C1 et C2 avec additions calcaires (Ca1 et Ca2), de pouzzolanes (Pz1 et Pz2) et superplastifiants SP1 et SP2, la variation $\Delta R_{C7}(SP-SSP)$, varie en plus ou en moins dans une marge très limitée par rapport à la variation des mortiers de référence en étant peu influencée par la quantité de l'addition dans le mélange. Ceci confirme le gain de résistance que peut procurer la présence de l'adjuvant superplastifiant dans les mélanges cimentaires avec additions fines.

Pour les mortiers C1 et C2 avec additions de fumée de silice, de laitier et de calcaire (Ca3) et superplastifiants SP1 et SP2, la variation $\Delta R_{C7}(SP-SSP)$, est d'autant plus importante que le taux de substitution du ciment est grand, en étant toujours maximale pour les mortiers avec fumée de silice. Ce comportement caractérise les mortiers avec additions qui affichent des besoins en eau importants dans les mortiers avec additions sans superplastifiant, réduisant ainsi, l'évolution des résistances en compression de ces mortiers. L'introduction de l'adjuvant superplastifiant a permis de réduire des quantités importantes d'eau permettant ainsi, des gains de résistance par rapport aux mortiers avec additions sans superplastifiants.

V.2 RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS

La corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants (SP) et sans superplastifiants (SSP) peut être représentée par les figures (VII.23) et (VII.24). Nous remarquons, que tous les points expérimentaux des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, se placent à gauche de la bissectrice, du côté des résistances des mortiers avec additions et superplastifiants quelque soit la nature du superplastifiant utilisé. Ceci confirme que les résistances en compression des mortiers avec additions à 28 jours sont plus importantes pour les mortiers avec additions et superplastifiants que pour les mortiers avec additions sans superplastifiants.

L'écart par rapport à la bissectrice est légèrement plus important dans le cas du superplastifiant SP1, confirmant la meilleure efficacité relative du superplastifiant SP1 par rapport au superplastifiant SP2.

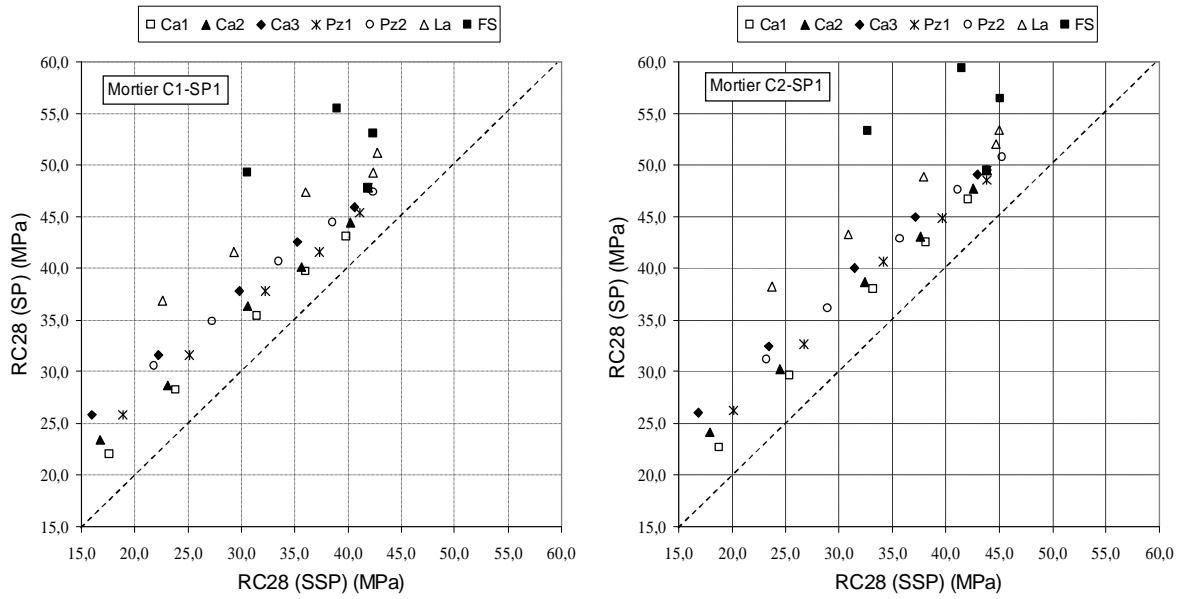


Figure VII.23: Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1

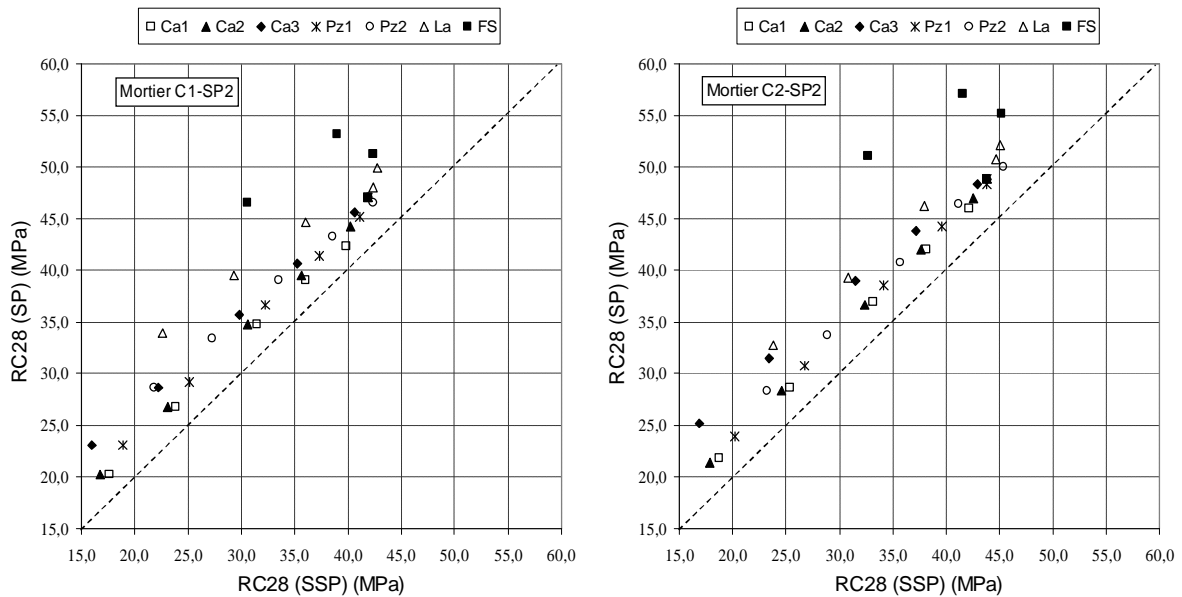


Figure VII.24: Corrélation entre les résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP2

Les points expérimentaux qui s'écartent le plus de la bissectrice sont les points des mortiers avec additions de fumée de silice et de laitier. Ces points correspondent aux mortiers avec additions qui sont caractérisés par des propriétés pouzzolaniques et des propriétés hydrauliques latentes, classés parmi les additions actives du type II selon la norme européenne EN 206-1.

D'autre part ces mortiers sont caractérisés par des besoins en eau importants dans les mortiers avec additions sans superplastifiants dont l'effet granulaire défavorable sur les résistances en compression a été compensé par l'utilisation d'adjuvants superplastifiants. Plus la réduction du besoin en eau a été importante par l'action du superplastifiant et plus l'écart entre les résistances en compression à 28 jours entre les mortiers avec superplastifiants et sans superplastifiants est grand. D'autre part, il est à noter que tous les points expérimentaux des mortiers avec additions se placent à gauche de la bissectrice, y compris les mortiers avec additions fines ($<5500 \text{ cm}^2/\text{g}$), à faibles taux de substitution ($<20\%$), qui sont classés par la norme européenne EN 206-1 comme additions du type I et caractérisés par une réduction du besoin en eau. Ceci, a été expliqué plus haut par l'utilisation dans les mortiers avec additions et superplastifiants, d'une quantité d'eau inférieure à celle du mortier de référence sans superplastifiants. Cette réduction de la quantité d'eau dans les mortiers avec additions et superplastifiants a permis un certain gain de résistance par rapport aux mortiers avec additions sans superplastifiants. De même que pour les résistances en compression à 07 jours, l'utilisation du superplastifiant a permis le maintien de la consistance de référence et en même temps améliorer l'hydratation du ciment par une meilleure répartition des particules, entraînant un gain de résistance complémentaire par rapport aux mortiers avec additions sans superplastifiants.

Les variations des résistances en compression à 28 jours, des mortiers C1 et C2 avec superplastifiants et sans superplastifiants notées $\Delta R_{C28}(\text{SP-SSP})$ en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux superplastifiants utilisés, peuvent être représentées par les figures (VII.25) et (VII.26). Nous remarquons que la variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers avec et sans superplastifiant est toujours positive, elle dépend de la nature du ciment, de la nature et de la quantité de l'addition dans les mortiers et de la nature du superplastifiant utilisé. Néanmoins, à quelques exceptions près, le comportement global de la variation est assez proche pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés, indépendamment des valeurs affichées.

La variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers de références, avec et sans superplastifiants SP1 et SP2, est plus importante pour le mortier C1 que pour le mortier C2 ; elle est de l'ordre de 5.94, 5.67, 5.13, et 4.98 MPa pour les mortiers de références C1-SP1, C2-SP1, C1-SP2 et C2-SP2, respectivement. Ceci confirme une meilleure efficacité du superplastifiant SP1 par rapport au superplastifiant SP2 et la meilleure efficacité des deux superplastifiants SP1 et SP2 avec le ciment C1 pour les résistances en compression à 28 jours.

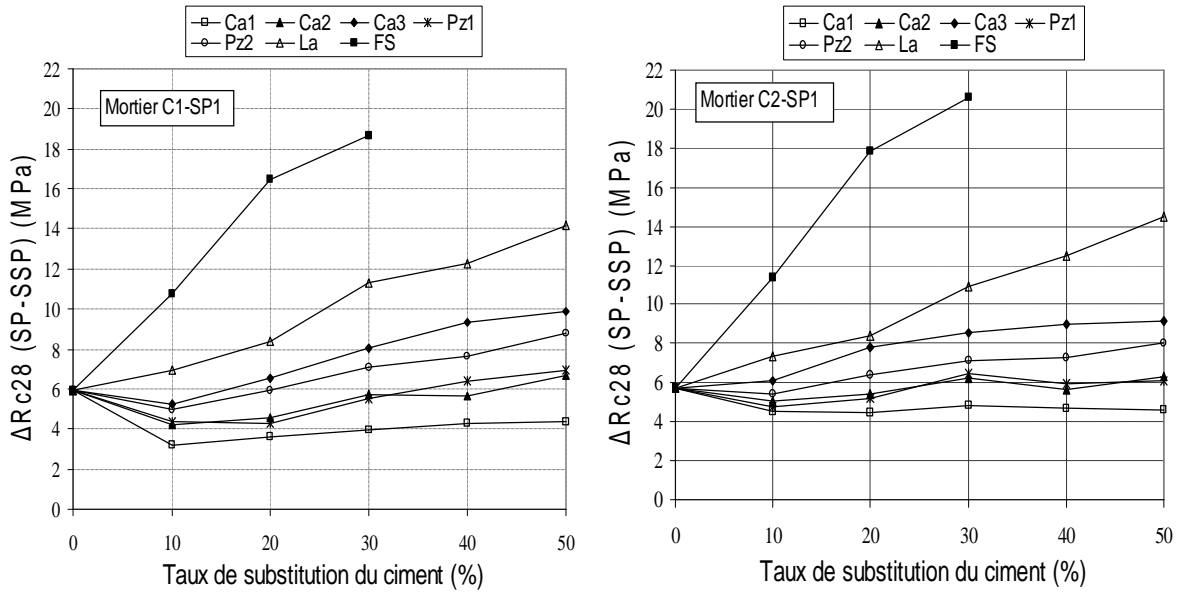


Figure VII.25: variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP1, $\Delta R_{C28}(\text{SP-SSP})$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

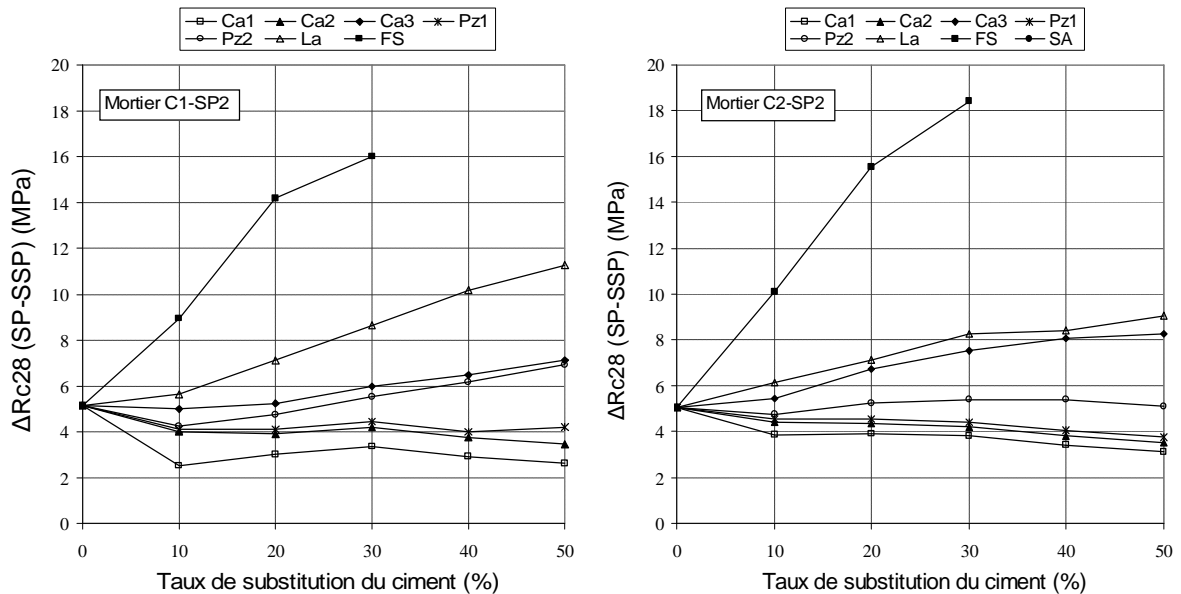


Figure VII.26: variation des résistances en compression à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec et sans superplastifiant SP2, $\Delta R_{C28}(\text{SP-SSP})$ en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Pour les mortiers C1 et C2 avec additions calcaires (Ca1 et Ca2) et de pouzzolanes (Pz1), la variation $\Delta R_{C28}(\text{SP-SSP})$, décroît légèrement à 10 % du taux de substitution du ciment puis se stabilise dans une marge réduite par rapport à la résistance des mortiers de référence en étant peu influencée par la nature et la quantité de l'addition dans le mélange.

Pour les mortiers C1 et C2 avec additions calcaires (Ca3) et de pouzzolanes (Pz2), la variation $\Delta R_{C28}(SP-SSP)$, subit un léger tassement puis croît avec le taux de substitution du ciment. Pour les mortiers C1 et C2 avec additions de fumée de silice et de laitier, la variation $\Delta R_{C28}(SP-SSP)$, est d'autant plus importante que le taux de substitution du ciment est grand. Les gains de résistances par rapport au mortier de référence sans superplastifiant, peuvent atteindre 17 MPa et 15 MPa pour la fumée de silice avec superplastifiant SP1 et SP2, respectivement et 8 MPa et 7 MPa pour le laitier avec superplastifiant SP1 et SP2, respectivement.

Ce comportement est valable pour les deux superplastifiants utilisés et est assez proche du comportement de la variation des résistances à 07 jours.

Nous pouvons donc déduire que les mortiers avec additions et superplastifiants affichent toujours des résistances en compressions à 07 jours et 28 jours plus importantes que les mortiers avec additions sans superplastifiants pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Le gain de résistance affiché par les mortiers avec additions et superplastifiants peut être expliqué d'une part par la réduction du besoin en eau dans les mortiers avec additions et superplastifiant et d'autre part, par l'amélioration du processus d'hydratation du ciment résultant d'une meilleure répartition des particules du ciment et des additions par le superplastifiant haut réducteur d'eau. La proportion du gain de résistance des mortiers avec additions et superplastifiant par rapport au mortier de référence sans additions dépend aussi de l'activité de l'addition elle-même. Ceci est visible essentiellement pour les additions de fumée de silice et de laitier, classées comme additions du type II, selon la norme européenne EN 206-1.

VI. EVALUATION DE L'APPORT DES ADDITIONS ET DES SUPERPLASTIFIANTS POUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES MORTIERS

L'apport des additions et des superplastifiants aux résistances en compression à 07 jours et 28 jours, peut être évalué en analysant la variation des résistances en compressions des mortiers avec additions et superplastifiants SP1 et SP2 (Mortier C-SP+add), par rapport aux mortiers de référence sans superplastifiants (Mortier Ref. C), en fonction du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés.

L'apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours et 28 jours pour les mortiers C1 et C2, dépend de la nature et de la quantité d'additions dans le mélange, ainsi que des natures des ciments et des superplastifiants utilisés. D'une manière générale, les figures (VII.27) à (VII.30), confirment l'apport positif de

l'action combiné des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours, à faibles taux de substitution du ciment par les additions, ainsi que le meilleur comportement des additions avec le ciment C2 et le superplastifiant SP1.

VI.1. RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS

L'apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours, peut être représenté en fonction du taux de substitution du ciment, par les figures (VII.27) et (VII.28), pour les mortiers C1 et C2, respectivement. L'apport des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours pour les mortiers de référence C1 et C2 sans additions, peut atteindre 12 % et 10 %, respectivement.

Pour les mortiers avec additions calcaires (Ca1 et Ca3), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Cet apport reste comme même favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment par l'addition (Ca3), pour les deux ciments utilisés avec le superplastifiant SP1. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 25 % et 24 % pour le ciment C1 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement ; alors qu'il peut atteindre 28 % et 26 % pour le ciment C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement.

L'apport des additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2), aux résistances en compression à 07 jours est défavorable, mais l'apport combiné avec les superplastifiants SP1 et SP2 reste favorable jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments. En effet, le gain relatif de résistance en compression à 07 jours est maximal pour les mortiers de références sans additions avec les superplastifiants SP1 et SP2.

Pour les mortiers avec additions de laitier (La), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 12 % et 10 % pour le ciment C1 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement ; alors qu'il peut atteindre 14 % et 13 % pour le ciment C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement.

Pour les mortiers avec fumée de silice (FS), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments avec le superplastifiant SP1. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 11 % et 09 % pour le ciment C1 avec les superplastifiants SP1 et SP2,

respectivement ; alors qu'il peut atteindre 12 % et 10 % pour le ciment C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement. Ces gains de résistances en compression à 07 jours sont équivalents aux gains apportés par les superplastifiants SP1 et SP2 dans les mortiers de références sans additions.

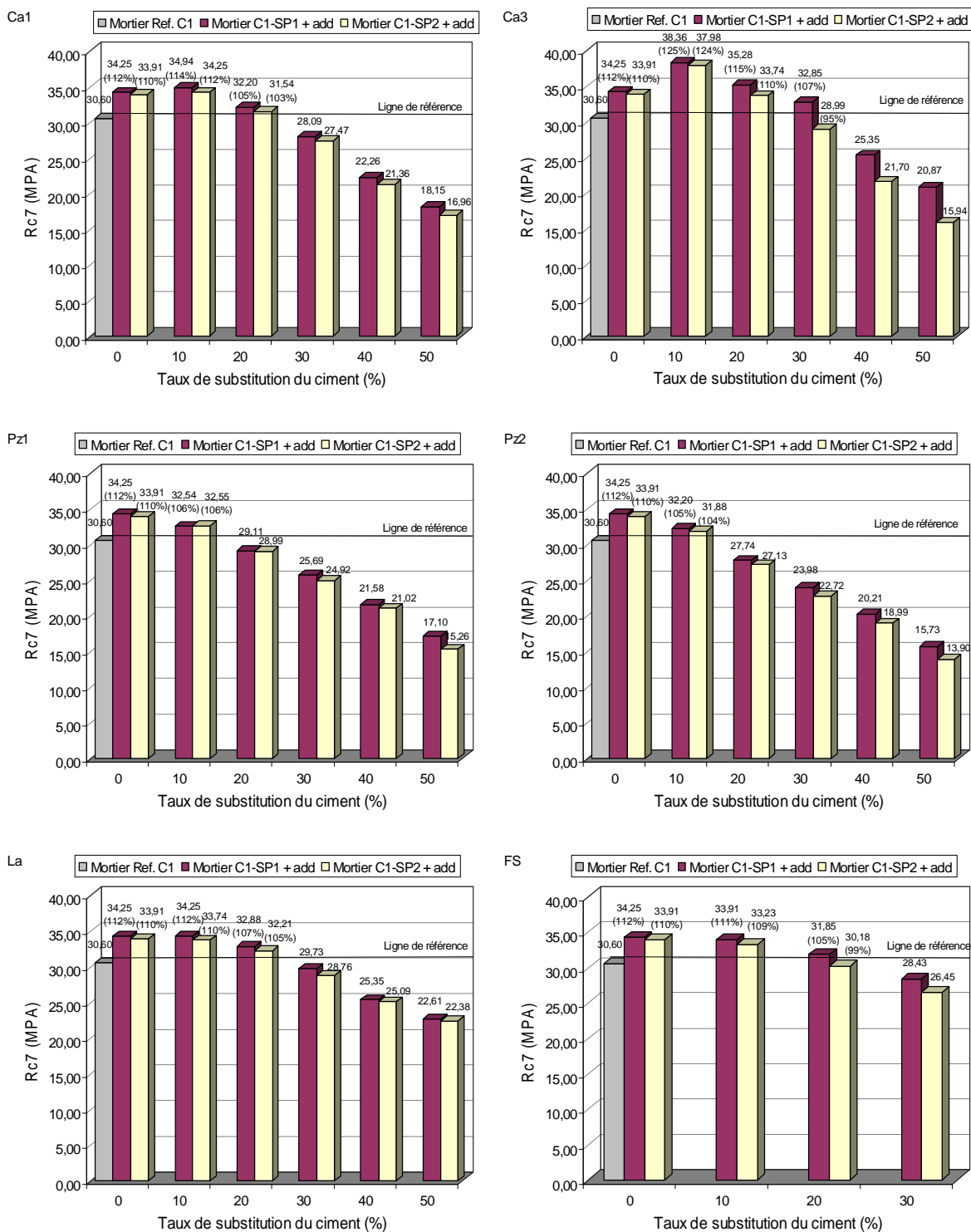


Figure VII.27: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours des mortiers C1

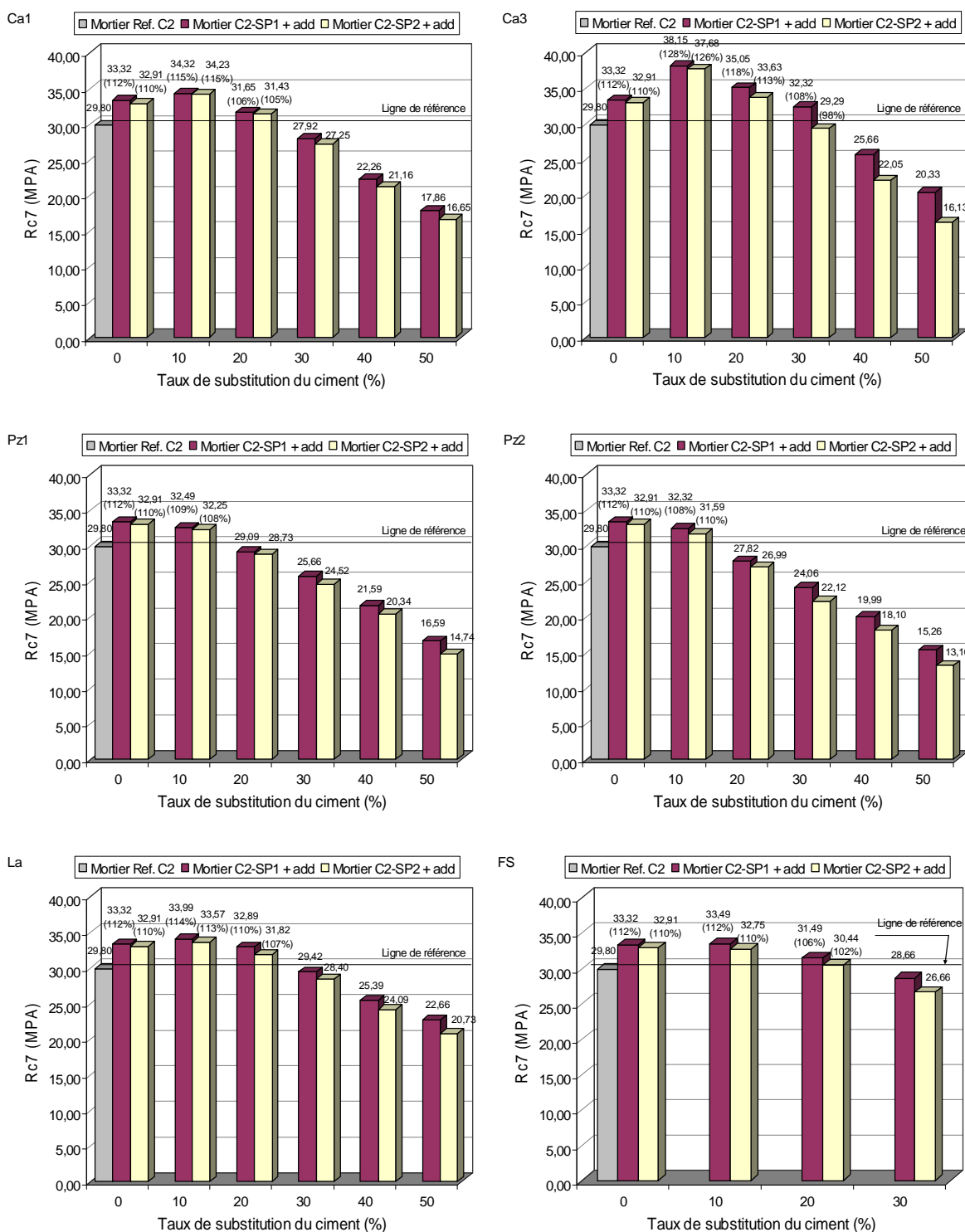


Figure VII.28: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours des mortiers C2

Nous pouvons donc confirmer que l'action combinée des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur les résistances en compression à 07 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment par les additions et le comportement des additions est meilleur

avec le ciment C2 et le superplastifiant SP1. Les additions calcaires apportent le meilleur gain des résistances en compression à 07 jours des mortiers en présence d'adjuvants fluidifiants. L'apport positif des additions calcaires est essentiellement dû à l'accélération du processus d'hydratation du ciment par les additions calcaires à jeunes âges, ainsi qu'à la réduction de la quantité d'eau nécessaire à la consistance de référence par l'utilisation des adjuvants superplastifiants.

VI.2. RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS

L'apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 28 jours, peut être représenté en fonction du taux de substitution du ciment, par les figures (VII.29) et (VII.30), pour les mortiers C1 et C2, respectivement.

L'apport des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 28 jours dans les mortiers de référence C1 et C2 sans additions, peut atteindre, respectivement 14 % et 12 %, pour le ciment C1 et 13 % et 12 %, pour le ciment C2.

L'apport des additions calcaires (Ca1 et Ca3), aux résistances en compression à 28 jours est défavorable, mais l'apport combiné avec les superplastifiants SP1 et SP2 reste favorable par rapport au mortier de référence jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments, et jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments avec le superplastifiant SP1, pour l'addition (Ca3). En effet, le gain relatif de résistance en compression à 28 jours est maximal pour les mortiers de références sans additions avec les superplastifiants SP1 et SP2.

Pour les mortiers avec additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Il est à noter que pour les mortiers C1 avec addition (Pz1) et superplastifiants SP1 et SP2, les résistances en compression à 28 jours n'atteignent dans ce cas que 99 % de la résistance du mortier de référence sans additions et sans superplastifiants. Le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 13 % et 11 % pour le ciment C1 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement ; alors qu'il peut atteindre 16 % et 14 % pour le ciment C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement.

Pour les mortiers avec additions de laitier (La), l'apport aux résistances en compression à 28 jours est maximal à 20 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 22 % et 19 % pour les deux ciments C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2.

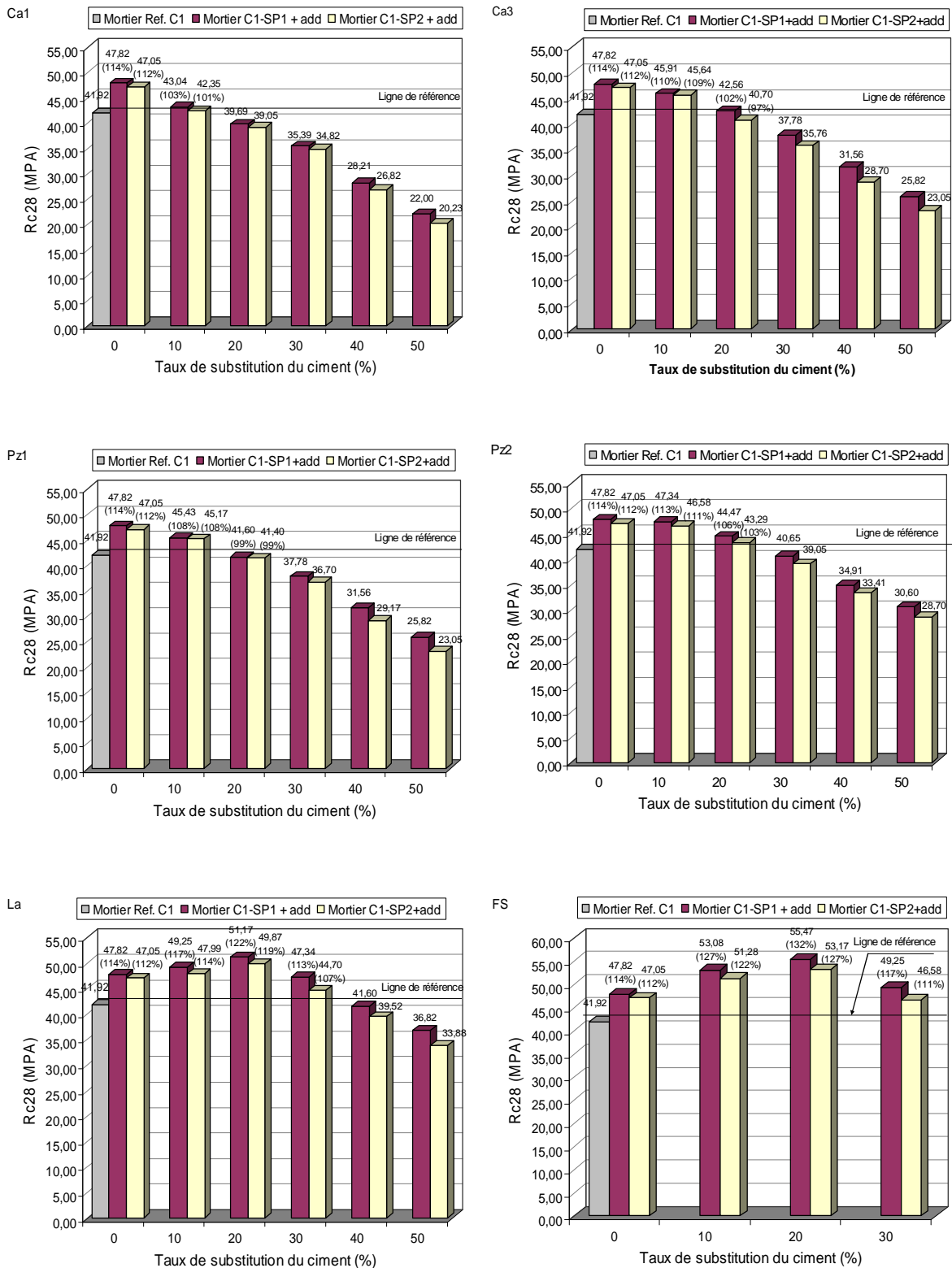


Figure VII.29: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 28 jours des mortiers C1

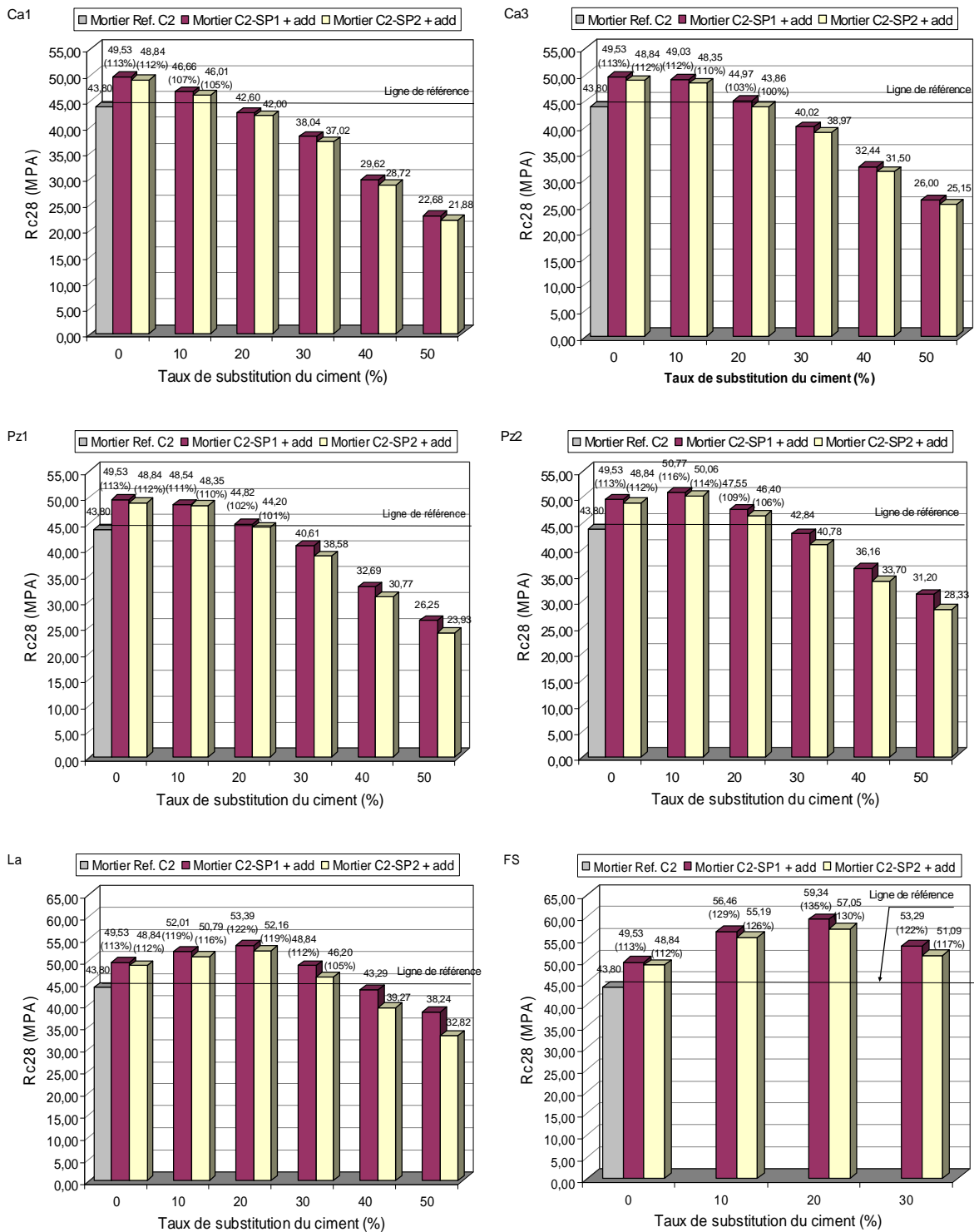


Figure VII.30: Apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 28 jours des mortiers C2

Pour les mortiers avec fumée de silice (FS), l'apport aux résistances en compression est maximal à 20 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression

peut atteindre avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement, 32 % et 27 % pour le ciment C1 ; alors qu'il peut atteindre 35 % et 30 % pour le ciment C2. Dans le cas d'une limitation du taux de substitution du ciment par la fumée de silice conformément à la norme européenne EN 206-1, le gain relatif de résistance en compression à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions peut atteindre avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement, 27 % et 22 % pour le ciment C1 ; alors qu'il peut atteindre 29 % et 26 % pour le ciment C2.

Nous pouvons donc confirmer que l'action combinée des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur les résistances en compression à 28 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment par les additions et le comportement des additions est meilleur avec le ciment C2 et le superplastifiant SP1. Cet apport aux résistances en compression à 28 jours est du en premier lieu à la maîtrise de l'effet granulaire défavorable pour certaines additions, par l'utilisation des superplastifiants SP1 et SP2 [6, 7, 11, 25 et 51]. L'utilisation des superplastifiants peut aussi participer à l'amélioration du processus d'hydratation du ciment comme le confirment plusieurs études [61-63, 68, 73, 84, 86]. En effet, Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline [68]. Une répartition plus uniforme du ciment pourrait elle aussi contribuer à l'augmentation de la résistance, car le processus d'hydratation est amélioré [61]. Ces phénomènes combinés ont pu engendrer un gain de résistance intéressant à l'image des mortiers de référence sans additions pour lequel l'amélioration peut atteindre 12 %, pour le mortier de référence C1 avec superplastifiant SP1.

En second lieu, cet apport aux résistances en compression à 28 jours est du à l'activité chimique de l'addition même, qui dans le cas des additions classés du type II selon la norme européenne EN 206-1, apportent un complément significatif au gain de résistance, qui peut atteindre en cumul jusqu'à 22 % pour les additions de laitier dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 à 20 % du taux de substitution du ciment et 29 % pour la fumée de silice dans les mortiers C2 avec superplastifiant SP1, à 10 % du taux de substitution du ciment.

L'apport positif des additions de laitier est essentiellement du à ses propriétés hydrauliques latentes, alors que celui de la fumée de silice est probablement du à l'effet pouzzolanique de ces additions qui se déclare assez tardivement.

V. SYNTHÈSE

La variation des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, en fonction du taux de substitution du ciment est similaire pour les deux superplastifiants utilisés, elle dépend de la nature minéralogique, la quantité et les caractéristiques granulaires (finesse) de l'addition incorporée.

L'action des additions calcaires sur le ciment est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges, à faible taux de substitution du ciment par l'addition. Cette accélération est peu influencée par la nature du ciment et elle est plus ou moins équivalente pour toutes ces additions calcaires, en étant plus prononcée pour les additions de grande finesse. Les mortiers avec additions de pouzzolanes présentent un meilleur comportement avec le ciment C2. Leurs résistances en compression se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 07 jours d'âge, à cause probablement d'un effet pouzzolanique qui se déclare plus tardivement.

La présence des additions de laitier granulé des hauts fourneaux dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment (<20 %) maintient la résistance en compression à 07 jours jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment et procure un gain de résistance intéressant à 28 jours avec un meilleur comportement des mortiers C2-SP1. Le gain de résistance dans les mortiers avec additions de laitier est probablement dû aux propriétés hydrauliques latentes du laitier vitrifié moulu, classé comme additions du type II par la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France. L'utilisation des superplastifiants a permis de réduire la quantité d'eau dans les mortiers avec additions de laitier et l'augmentation des résistances en compression jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment. L'utilisation combinée de la fumée de silice et des superplastifiants dans les mortiers C1 et C2 a permis de limiter la chute des résistances en compression à 07 jours et procurer des gains de résistance intéressants à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition. La contribution des additions minérales à l'amélioration des résistances en compression à 07 jours et 28 jours a été expliquée dans le chapitre IV. Néanmoins, l'amélioration du comportement des mortiers avec additions et superplastifiants a été favorisée par la réduction de la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires avec additions et superplastifiants.

Les résistances en compression des mortiers avec additions à 07 jours sont proches pour les deux ciments, en étant globalement légèrement plus importantes pour les mortiers C1. Par contre, les résistances en compression à 28 jours sont globalement plus importantes pour les mortiers C2 avec les deux superplastifiants utilisés. La variation $\Delta R_{C7}(C1-C2)$, est limitée dans un champs assez réduit ; par contre la variation $\Delta R_{C28}(C1-C2)$, s'étale sur un champs plus large et dépendent essentiellement de la nature du ciment, mais

aussi de la nature des additions incorporée et de leurs quantités dans les mélanges cimentaires.

Les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2 sont beaucoup influencées par la finesse des additions. Cette influence dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée dans le mélange, mais reste peu influencée par la nature du ciment et du superplastifiant. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une diminution des résistances en compression à 07 jours et une augmentation des résistances en compression à 28 jours. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est grand. Pour les additions calcaires, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation des résistances en compression à 07 et 28 jours.

Les résistances en compression des mortiers avec additions à 07 jours et 28 jours sont plus importantes pour les mortiers avec additions et superplastifiants que pour les mortiers avec additions sans superplastifiants. L'écart des résistances a confirmé la meilleure efficacité du superplastifiant SP1 par rapport au superplastifiant SP2. Le gain de résistance affiché par les mortiers avec additions et superplastifiants a pu être expliqué d'une part par la réduction du besoin en eau dans les mortiers avec additions et superplastifiants et d'autre part, par l'amélioration du processus d'hydratation du ciment résultant d'une meilleure répartition des particules du ciment et des additions par le superplastifiant haut réducteur d'eau. La proportion du gain de résistance des mortiers avec additions et superplastifiant par rapport au mortier de référence sans additions dépend aussi de l'activité de l'addition même. Ceci est visible essentiellement pour les additions de fumée de silice et de laitier, classées comme additions du type II, selon la norme européenne EN 206-1.

L'apport des additions et des superplastifiants SP1 et SP2 aux résistances en compression à 07 jours et 28 jours pour les mortiers C1 et C2, dépend de la nature et de la quantité d'additions dans le mélange, et des natures des ciments et des superplastifiants utilisés. D'une manière plus précise, nous pouvons avancer que l'utilisation combinée des additions minérales et des superplastifiants peut avoir un apport positif sur les résistances en compression à 28 jours, pour toutes les additions et les superplastifiants utilisés, quelque soit la nature du ciment. Cet apport, par rapport au mortier de référence reste favorable pour les additions calcaires jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, et même jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, dans le cas du superplastifiant SP1, pour l'addition (Ca3). Pour les additions de pouzzolanes, cet apport, par rapport au mortier de référence reste favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment. Le gain relatif peut atteindre à 10 % du taux de substitution du ciment 13 % et 11 % pour le ciment C1 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement ; alors qu'il peut atteindre 16 % et 14 % pour le ciment C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement. Pour les mortiers avec

additions de laitier, cet apport reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment. Dans ce cas, le gain relatif maximal peut atteindre à 20 % du taux de substitution du ciment, 22 % et 19 % pour les deux ciments C1 et C2 avec les superplastifiants SP1 et SP2. Pour les fumées de silice, cet apport est maximal à 20 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment. Dans le cas d'une limitation du taux de substitution du ciment par la fumée de silice conformément à la norme européenne EN 206-1, le gain relatif de résistance en compression à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions peut atteindre avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement, 27 % et 22 % pour le ciment C1 ; alors qu'il peut atteindre 29 % et 26 % pour le ciment C2.

L'apport aux résistances en compression à 28 jours est du en premier lieu à réduction de la quantité d'eau dans les mortiers avec additions, par l'utilisation des superplastifiants SP1 et SP2, qui se traduit par un gain de résistance intéressant à l'image des mortiers de référence sans additions. En second lieu, cet apport aux résistances en compression à 28 jours est du à l'activité chimique de l'addition même, qui dans le cas des additions classés en type II selon la norme européenne EN 206-1, apportent un complément significatif au gain de résistance.

ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS DANS LES MORTIERS AVEC SUPERPLASTIFIANTS

I. INTRODUCTION

Dans le chapitre V, on avait déterminé les effets à l'origine des modifications engendrées par l'incorporation d'additions minérales dans les mélanges cimentaires à caractéristiques rhéologiques constantes sans adjuvants superplastifiants. Plusieurs études dans ce domaine s'accordent pour distinguer trois principaux effets qui se superposent pour influencer les propriétés du matériau cimentaire à l'état frais et durci et qui ont été précédemment définis: un effet granulaire, un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique.

A fin de permettre une évaluation plus précise de l'activité chimique de chaque addition qui englobe les effets physico-chimique et microstructuraux ainsi que l'effet chimique propre de chaque addition utilisée, il a fallu maîtriser l'effet granulaire et maintenir constante la compacité du squelette solide des mélanges avec additions.

Pour assurer ces conditions, les effets ainsi définis ont été évalués en suivant une méthodologie expérimentale spécifique qui est basée sur trois conditions essentielles :

- L'introduction des additions dans le mélange en substitution volumique du ciment pour garantir le maintien du volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire dans les différents mélanges,
- Le maintien de la consistance du mélange frais constante pour garantir une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire pour toutes les formulations avec ou sans additions, permettant la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire, ce qui permet de limiter éventuellement la variation du volume d'air occlus.
- Le maintien de la quantité d'eau constante pour toutes les formulations étudiées pour garantir le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais en supposant que le volume d'air occlus dans les mortiers ne varie pas significativement. Ceci a été possible par l'utilisation d'adjuvants fluidifiants conformes à la norme NF EN 934-2.

Dans ces conditions, la porosité initiale et le volume de la matrice cimentaire des mortiers restent constants indépendamment du caractère et de l'intensité de l'effet granulaire des additions.

En appliquant aux mortiers avec adjuvants fluidifiants les principes du modèle prédictif de Féret [1], et en se basant sur la notion de liant équivalent définie par la norme européenne EN 206-1 ; le facteur d'activité K_F peut être évalué en utilisant l'équation (II.15), en considérant que la porosité initiale (e_{r+v_r}) du mortier de référence reste inchangée pour

toutes les formulations des mortiers avec additions et adjuvants fluidifiants, car la quantité d'eau utilisée dans le mélange est constante et le serrage et le volume d'air qui en résultent sont similaires :

$$K_F = \frac{c_r \sqrt{R_c/R_{cr}}}{f \left[\frac{c_r}{e_r + v_r} (1 - \sqrt{R_c/R_{cr}}) + 1 \right]} - \frac{c}{f} \quad (\text{II.15})$$

De même, en se basant sur le modèle prédictif de Bolomey, le facteur d'activité K_B peut être évalué en utilisant l'équation (II.16) en considérant que la porosité initiale reste inchangée pour toutes les formulations de mortiers avec additions et adjuvants fluidifiants:

$$K_B = \frac{R_c C_r}{R_{cr} F} - \frac{C}{F} + \frac{E_r + V_r}{2F} \left(1 - \frac{R_c}{R_{cr}} \right) \quad (\text{II.16})$$

L'analyse de la variation du coefficient d'activité K_F ou K_B en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition peut nous informer sur l'activité chimique propre à chaque addition étudiée.

II. ACTIVITE CHIMIQUE DES ADDITIONS MINERALES DANS LES MORTIERS AVEC SUPERPLASTIFIANTS

II.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 07 JOURS

Les variations des facteurs d'activité chimiques des additions à 07 jours, en fonction des taux de substitution du ciment par les additions pour les mortiers C1 et C2 avec le superplastifiant SP1, sont représentées par les figures (VIII.1) et (VIII.2), dans le cas des modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement.

Nous pouvons constater que les facteurs d'activités des différentes additions à 07 jours dans les mortiers avec superplastifiant SP1, sont très variables, ils dépendent de la nature du ciment utilisé, du modèle de résistance adopté, de la nature minéralogique et chimique de l'addition, de ses caractéristiques granulaires et du taux de la substitution de ciment par les additions. D'une façon générale, les facteurs d'activité chimiques à 07 jours des différentes additions présentent des variations similaires en fonction du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments C1 et C2 utilisés et pour les deux modèles prédictifs de résistance adoptés. Ces facteurs sont plus importants pour les mortiers C2-SP1 que pour les mortiers C1-SP1. Ils sont encore plus forts dans le cas de l'adoption du modèle prédictif de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret.

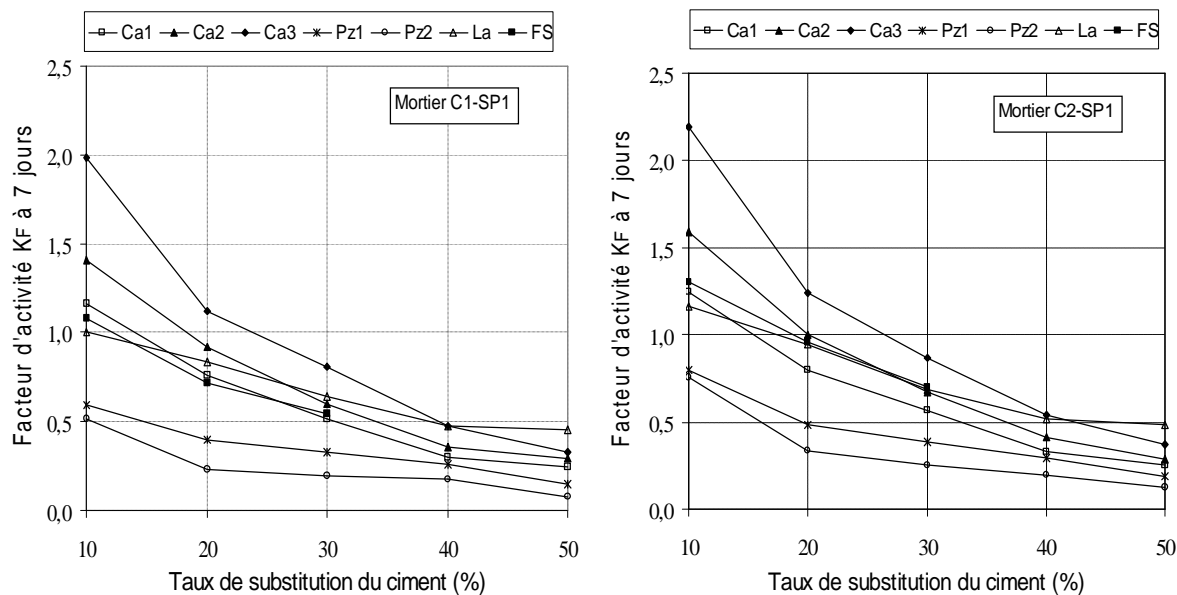


Figure VIII.1 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Féret

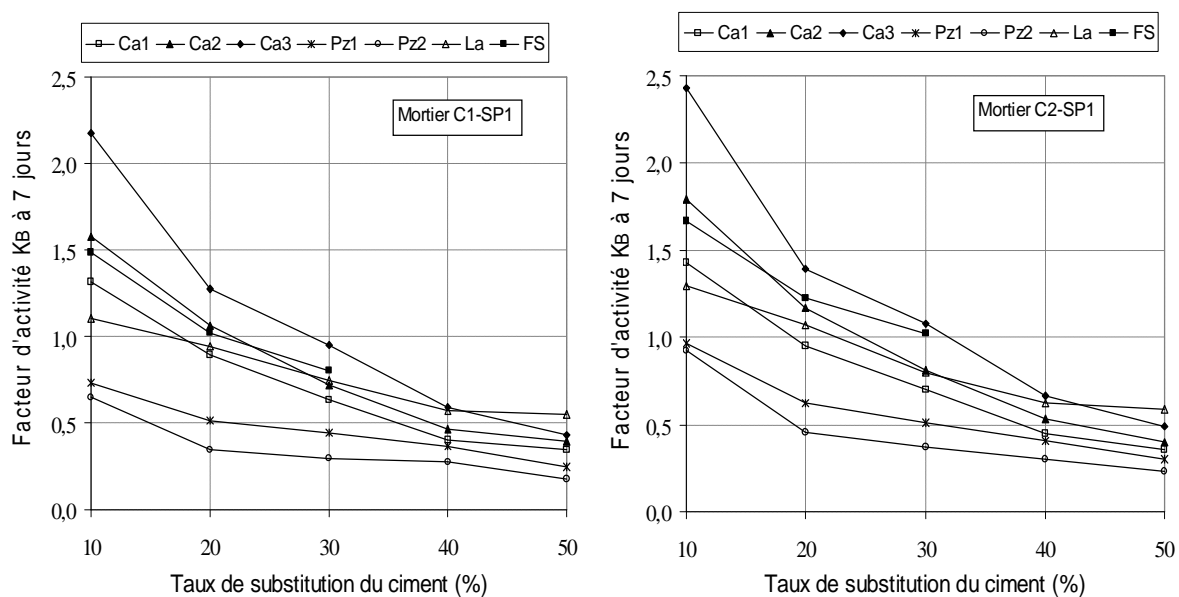


Figure VIII.2 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Bolomey

A faibles taux de substitution du ciment, Les additions calcaires (Ca3) présentent à 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité à 07 jours le plus important parmi toutes les additions utilisées. Il atteint des valeurs de 1.99 et 2.19 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 2.17 et 2.43 pour les mortiers

C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans le cas du modèle de Bolomey. Comme dans le cas des mortiers avec additions sans superplastifiants, les facteurs d'activité des additions calcaires sont dans ce cas, significatifs en raison d'effets physico-chimiques favorables à cet âge du mortier, qui sont d'autant plus forts que la finesse de l'addition est grande. Les additions de pouzzolanes présentent les facteurs d'activité les plus faibles, avec une meilleure activité pour les additions (Pz1), de moindre finesse. Les additions de laitier, présentent des facteurs d'activité à 07 jours intermédiaires entre les additions calcaires et les additions de pouzzolanes. A 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité des additions de laitier atteint des valeurs de 1.0 et 1.16 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 1.11 et 1.29 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement, dans le cas du modèle de Bolomey. La fumée de silice présente un facteur d'activité intermédiaire entre celui des additions calcaires et de laitier dans le cas des facteurs calculés à partir du modèle de Féret et entre celui des additions calcaires dans le cas des facteurs calculés à partir du modèle de Bolomey, pour les deux ciments utilisés. À plus forts taux de substitution de ciment, la fumée de silice et les additions de laitier deviennent plus actives en raison d'effets physico-chimiques favorables. Les additions de pouzzolanes (PZ1 et PZ2) présentent les facteurs d'activité les plus faibles pour tous les taux de substitution du ciment, et sont d'autant plus faibles que la finesse de l'addition est grande. L'activité des additions calcaires est fortement réduite dans ce cas, avec un meilleur comportement des additions les plus fines pour tous les taux de substitution du ciment et pour les deux ciments utilisés.

II.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 28 JOURS

Les variations des facteurs d'activité chimiques des additions à 28 jours dans les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, en fonction des taux de substitution du ciment par les additions sont représentées par les figures (VIII.3) et (VIII.4), pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement. À faibles taux de substitution du ciment, la fumée de silice présente à 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité à 28 jours le plus important parmi toutes les additions utilisées. Il atteint des valeurs de 1.9 et 2.15 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 2.52 et 2.87 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans cas du modèle de Bolomey. Comme dans le cas des mortiers avec additions sans superplastifiants, les facteurs d'activité de la fumée de silice sont dans ce cas, significatifs en raison des réactions pouzzolaniques qui se déclarent à cet âge du mortier.

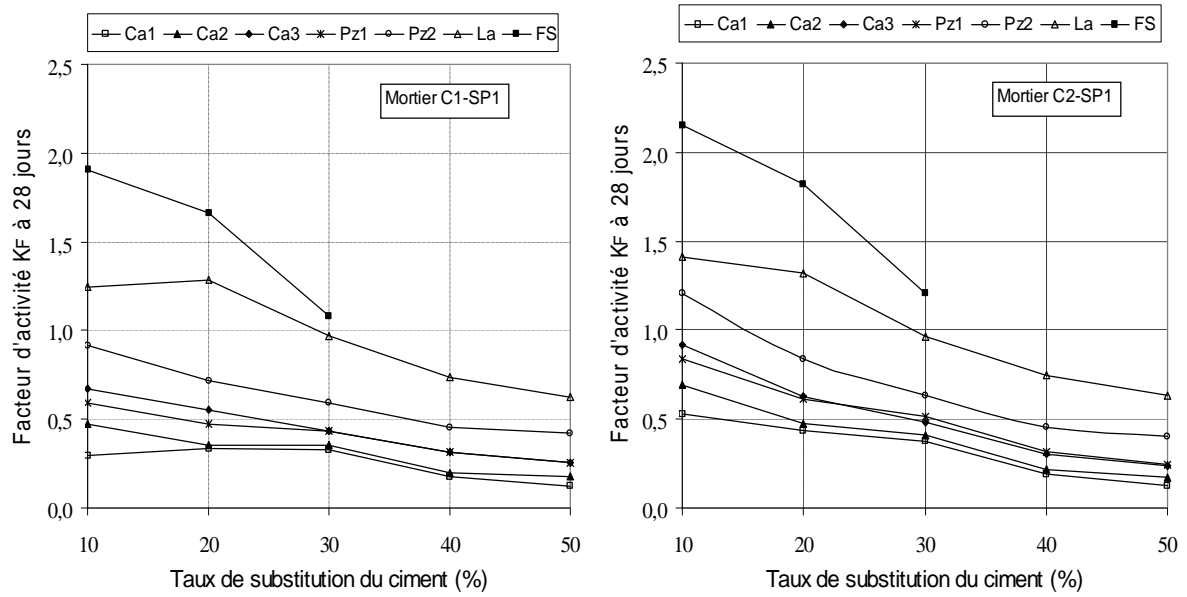


Figure VIII.3 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Féret

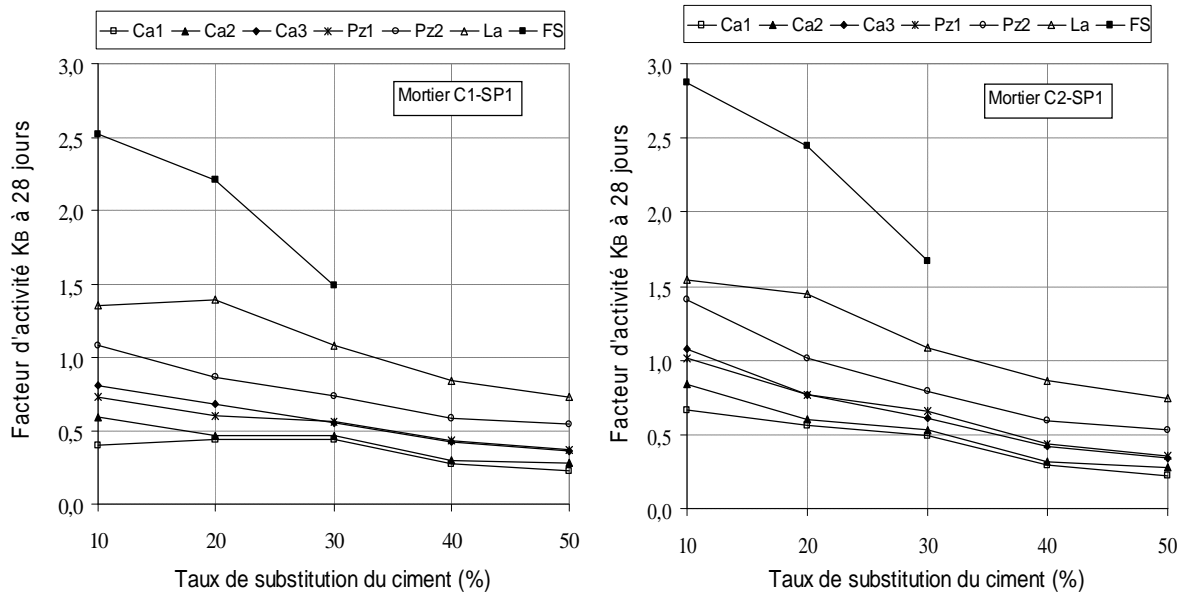


Figure VIII.4 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1, pour le modèle de Bolomey

Les facteurs d'activité des additions calcaires sont dans ce cas, beaucoup plus faibles en raison de l'atténuation des effets physico-chimiques qui sont d'autant plus faibles que la finesse de l'addition est petite. Les additions de laitier et de pouzzolanes (Pz2), présentent des facteurs d'activité intermédiaires, avec une meilleure activité pour l'addition

de laitier à 20 ou 10 % du taux de substitution du ciment, pour lesquelles le facteur d'activité atteint des valeurs de 1.25 et 1.41 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 1.4 et 1.54 pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1, respectivement dans cas du modèle de Bolomey. Ces facteurs d'activité sont dans ce cas plus importants que dans les mortiers sans superplastifiants.

À forts taux de substitution du ciment, les additions calcaires sont aussi les moins actives chimiquement. Les additions de laitier et de pouzzolanes présentent un comportement intermédiaire avec une meilleure activité pour les additions (La) caractérisées par des propriétés hydrauliques latentes. Les additions (Pz2) présentent des facteurs d'activité plus forts que les additions (Pz1) de finesse moins importante.

Nous pouvons également noter sur les figures (VIII.1) à (VIII.4), que les facteurs d'activité des différentes additions utilisées, décroissent avec le temps pour les additions calcaires, alors qu'ils croissent pour toutes les autres additions, pour les deux ciments utilisés.

Les résultats avancés pour les facteurs d'activité des additions à 07 jours et 28 jours dans les mortiers avec additions et superplastifiants, rejoignent les conclusions avancées précédemment pour les mortiers avec additions sans superplastifiants. En effet, l'activité chimique des additions minérales à 07 jours et 28 jours est confirmée par plusieurs auteurs [4, 5, 8, 9, 12, 26-28, 32, 33, 36] et les phénomènes à l'origine de cette activité chimique ont été expliquée dans le chapitre V. D'autre part, il est à noter que les facteurs d'activité des additions utilisées (Ca1, Ca2, Ca3, Pz1, Pz2 et La) à 07 jours et 28 jours, sont plus forts dans les mélanges avec superplastifiants que dans le mélanges sans superplastifiants. Ceci est probablement du à l'amélioration du processus d'hydratation des additions par les superplastifiants au même titre que pour les ciments [61-63, 68, 73, 84, 86]. En effet, Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline [68]. Une répartition plus uniforme du ciment pourrait elle aussi contribuer à l'amélioration du processus d'hydratation [61]. Pour la fumée de silice, l'activité chimique se déclare mieux dans les mélanges cimentaires sans superplastifiants. Ceci peut être justifié par l'influence de l'action de l'eau sur le processus d'hydratation, dont la quantité a été beaucoup plus réduite dans le cas des mortiers avec fumée de silice et superplastifiants.

L'analyse des résultats obtenus pour les facteurs d'activité des additions à 28 jours, par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France, dans le cas du superplastifiant SP1, permet de constater ce qui suit :

- Pour la fumée de silice, la valeur de k à 10 % du taux de substitution du ciment, est de 1.9 et 2.15 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et

2.52 et 2.87 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans cas du modèle de Bolomey. Il en résulte donc que la valeur de k est pratiquement justifiée pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Néanmoins le modèle de Féret engendre un coefficient k juste limite (1.9) dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5)

- Pour les additions calcaires, la valeur de k à 10 % du taux de substitution, varie de 0.3 à 0.68 et 0.53 à 0.92 pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 0.4 à 0.81 et 0.66 à 1.08 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est largement justifiée pour les additions calcaires de différentes finesses, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 30 % et 40 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement.

- Pour les additions de pouzzolanes, la valeur de k à 10 % du taux de substitution, varie de 0.59 à 0.92 et 0.84 à 1.2 pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 0.73 à 1.08 et 1.01 à 1.41 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est largement justifiée pour les additions de pouzzolanes de différentes finesses, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 40 % et 50 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement.

- Pour les additions de laitier vitrifié moulu, la valeur de k varie pour 10 % et 20 % du taux de substitution, de 1.25 à 1.29 et 1.41 à 1.32 pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 1.35 à 1.4 et 1.54 à 1.45 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est justifiée pour les additions de laitier, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey.

Il en résulte donc que les valeurs des facteurs d'activité qui résultent de cette étude dans le cas des mortiers avec superplastifiants sont très variables et dépendent de la nature de l'addition incorporée, de ses caractéristiques granulaires, de sa proportion dans le mélange, de la nature du ciment utilisé, de l'âge du mortier considéré et du modèle de résistance adopté. Ces facteurs sont pratiquement justifiés par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Néanmoins le modèle de Féret, engendre un coefficient k juste limite (1.9) pour la fumée de silice dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5). Cette valeur est inférieure à la valeur du facteur d'activité $k = 2.0$, préconisée par la norme européenne pour la fumée de silice avec le ciment CEM I de classe 42.5 et plus.

III. INFLUENCE DE LA NATURE DU SUPERPLASTIFIANT SUR LES FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS

III.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 07 JOURS

Afin d'étudier l'influence de la nature du superplastifiant sur les facteurs d'activité des mortiers avec additions, nous présentons sur les figures (VIII.5) et (VIII.6) les variations des facteurs d'activité des additions à 07 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2, dans le cas des modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement. Nous pouvons constater que les facteurs d'activité des différentes additions à 07 jours dans les mortiers C1 et C2 avec le superplastifiant SP2 sont globalement moins importants qu'avec le superplastifiant SP1 pour les deux modèles de résistances de Féret et de Bolomey. Néanmoins, la variation des facteurs d'activité des différentes additions à 07 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2 suit globalement les mêmes comportements en fonction du taux de substitution du ciment et le classement relatif des facteurs d'activité des différentes additions fines et ultrafines pour les deux ciments utilisés, se trouve globalement maintenu à l'exception de quelques bouleversements dans les mortiers C2 avec additions Ca1, La et FS, à faibles taux de substitution du ciment.

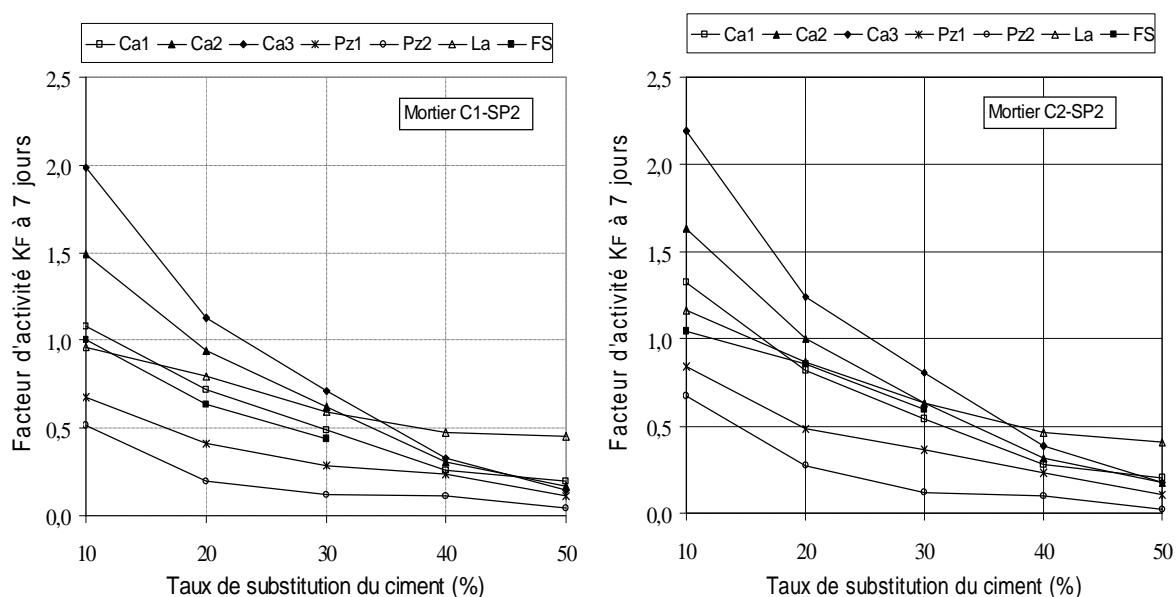


Figure VIII.5 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours en fonction du taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Féret

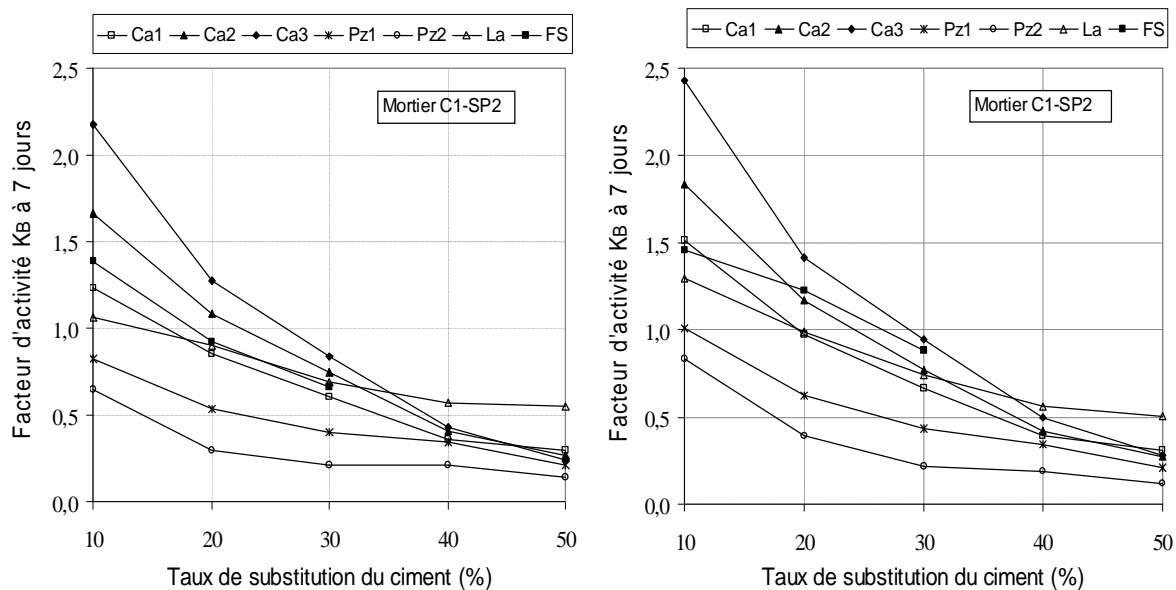


Figure VIII.6 : Variation des facteurs d'activité des additions à 07 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Bolomey,

La corrélation des facteurs d'activité des additions à 07 jours des mortiers C1 et C2 avec additions, par rapport à la nature du superplastifiant, pour le modèle de résistance de Férét (figure VIII.7) et le modèle de résistance de Bolomey (figure VIII.8), montre que la majorité des points expérimentaux des facteurs d'activité à 07 jours, se placent légèrement à droite de la bissectrice du côté de l'axe des facteurs d'activité des mortiers avec additions et superplastifiant SP1.

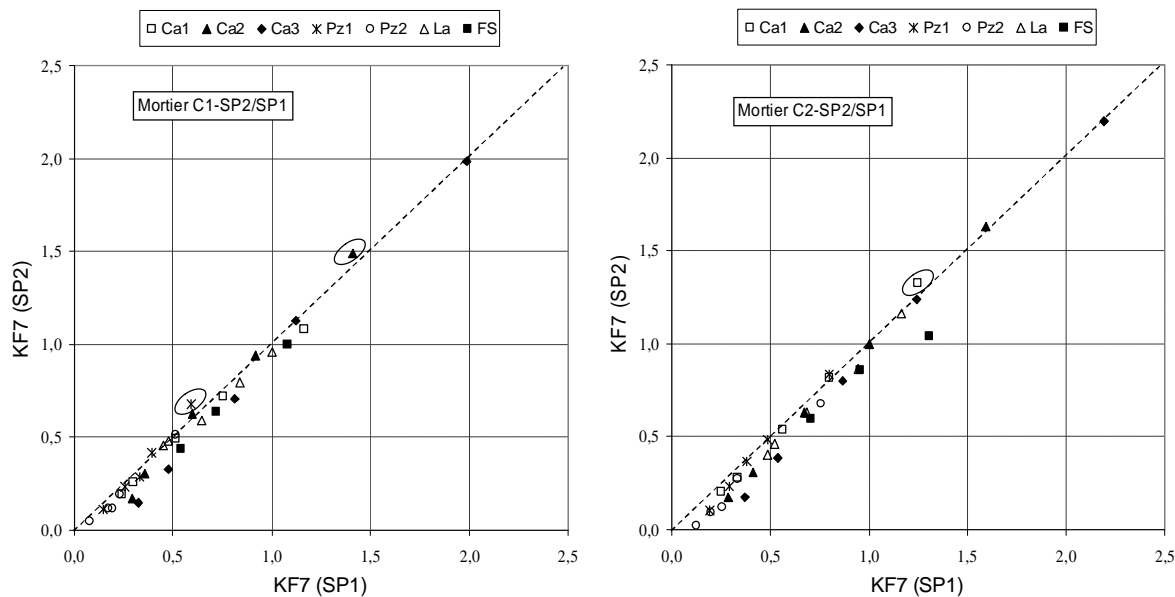


Figure VIII.7 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 07 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Férét

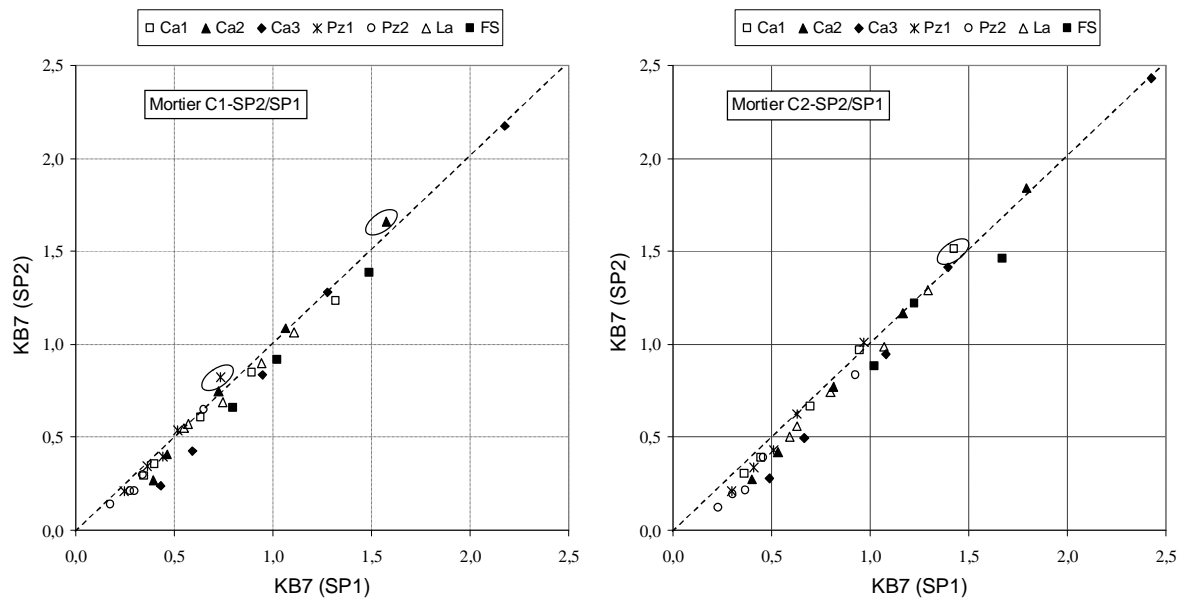


Figure VIII.8 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 07 jours, des mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Bolomey

Ceci montre que les facteurs d'activité des additions à 07 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec additions, sont généralement plus importants que les facteurs d'activité des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions, confirmant le meilleur comportement des additions avec le superplastifiant SP1. Certains points expérimentaux divergent de ce constat et il s'agit essentiellement des additions (Ca2, 10%) et (Pz1, 10%), pour le mortier C1 et (Ca1, 10%), pour le mortier C2.

Nous pouvons aussi remarquer que l'écart par rapport à la bissectrice de la majorité des points expérimentaux des facteurs d'activité des différentes additions utilisées à 07 jours est pratiquement équivalent pour les deux ciments utilisés et pour les deux modèles de résistance adoptés, ce qui montre que l'influence de la nature du superplastifiant sur les facteurs d'activité à 07 jours est indépendante de la nature du ciment et du modèle de résistance adopté. Néanmoins, les points expérimentaux de la fumée de silice et de pouzzolanes (Pz2) paraissent plus proches de la bissectrice dans le cas des mortiers C1 que dans le cas des mortiers C2 avec additions, ce qui suggère que le superplastifiant SP1 est plus efficace avec ces additions dans les mortiers C2. Pour les additions calcaires (Ca3), l'écart par rapport à la bissectrice est assez visible dans les deux mortiers avec additions, ce qui suggère que ces additions sont plus sensibles à la nature du superplastifiant que les autres, quelque soit la nature du ciment utilisé.

Ces écarts peuvent être quantifiés en analysant les variations des facteurs d'activité des additions à 07 jours, notées $\Delta K_{F7}(SP2-SP1)$ et $\Delta K_{B7}(SP2-SP1)$, pour les modèles de

résistance de Féret et de Bolomey, respectivement, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux superplastifiants utilisés (figures VIII.9 et VIII.10).

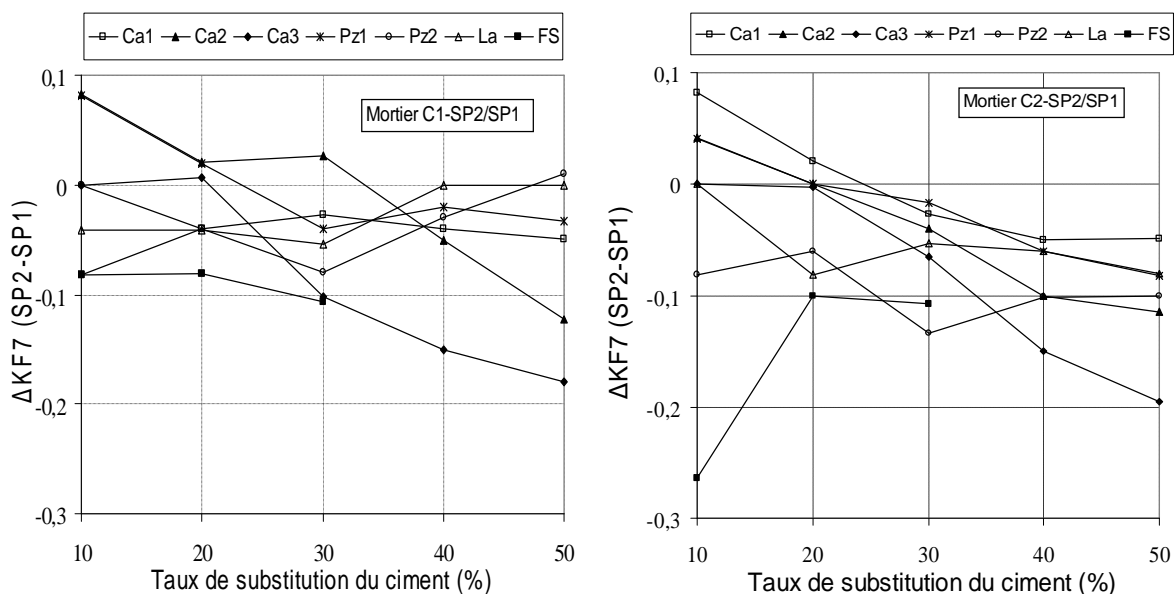


Figure VIII.9: Variation des facteurs d'activité des additions à 7 jours $\Delta K_{F7}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Féret

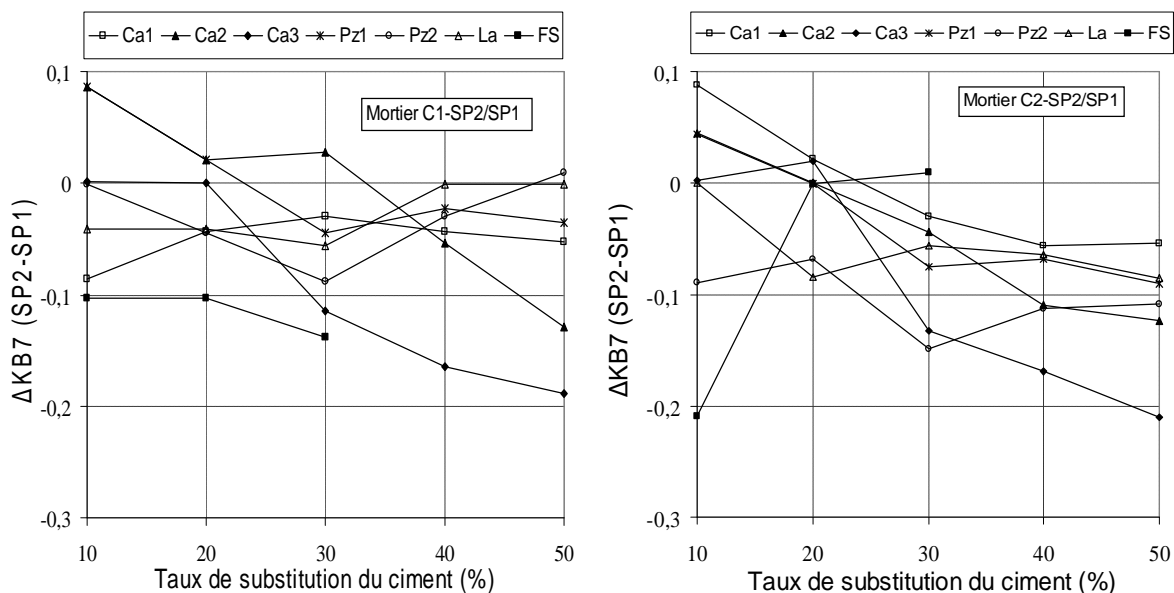


Figure VIII.10: Variation des facteurs d'activité des additions à 7 jours $\Delta K_{B7}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Bolomey

Les variations des facteurs d'activité des additions à 07 jours $\Delta K_{F7}(SP2-SP1)$ et $\Delta K_{B7}(SP2-SP1)$, varient pour les modèles de Féret et de Bolomey, entre -0.2 et 0.1 pour le mortier C1 avec additions et entre -0.3 et 0.1 pour le mortier C2, pour tous les taux de substitution du ciment. Cette variation est limitée dans un champ encore plus réduit pour la majorité des additions et pour tous les taux de substitution du ciment, à l'exception de quelques additions pour des taux de substitution limités, comme cela a été constaté précédemment (figures VIII.7 et VIII.8). Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 07 jours ne sont que légèrement influencés par la nature du superplastifiant. Cette influence est en général indépendante de la nature du ciment et du modèle de résistance adopté.

III.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS A 28 JOURS

Les variations des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2, dans le cas des modèles de résistance de Féret et de Bolomey, sont représentées par les figures (VIII.11) et (VIII.12), respectivement. Nous pouvons constater, que les facteurs d'activité des différentes additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec le superplastifiant SP2 sont globalement moins importants qu'avec le superplastifiant SP1 pour les deux modèles de résistances de Féret et de Bolomey.

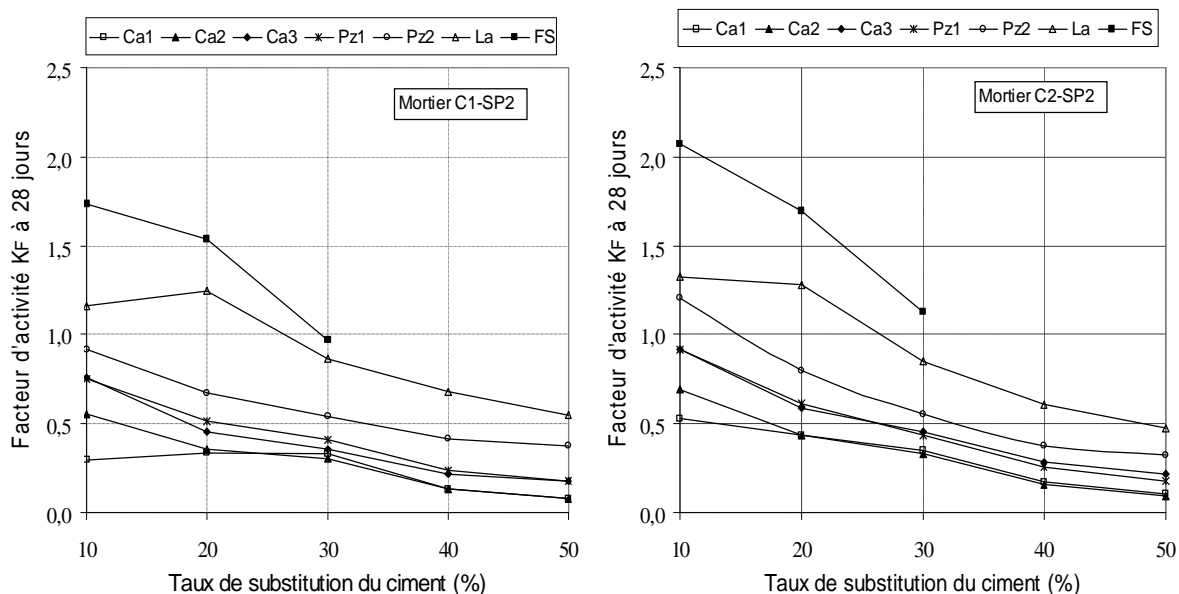


Figure VIII.11 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Féret

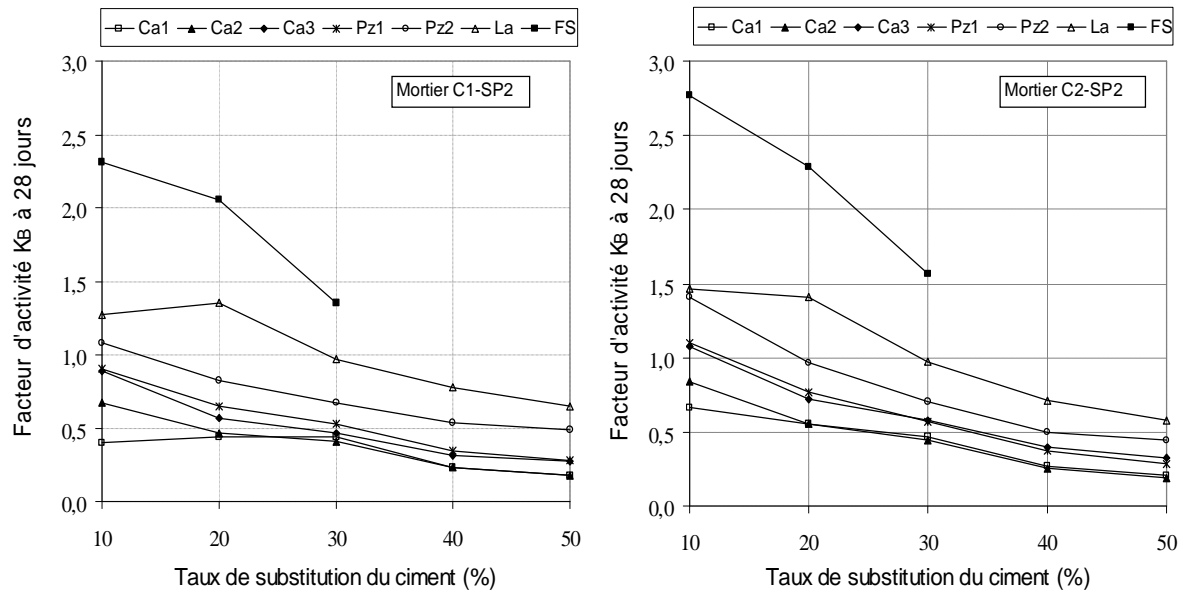


Figure VIII.12: Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction des taux de substitution du ciment dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2, pour le modèle de Bolomey

Néanmoins, la variation des facteurs d'activité des différentes additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2 suit globalement les mêmes comportements en fonction du taux de substitution du ciment et le classement relatif des facteurs d'activité des différentes additions fines et ultrafines pour les deux ciments utilisés, se trouve globalement maintenu.

L'analyse des résultats obtenus pour les facteurs d'activité des additions à 28 jours, par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France, dans le cas du superplastifiant SP2, permet de constater ce qui suit :

- Pour la fumée de silice, la valeur de k à 10 % du taux de substitution du ciment, est de 1.74 et 2.07 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans le cas du modèle de Féret, et 2.31 et 2.77 pour les mortiers C1 et C2, respectivement dans cas du modèle de Bolomey. Il en résulte donc que la valeur de k est justifiée pour les deux ciments et pour le modèle prédictif de résistance de Bolomey. Néanmoins le modèle de Féret engendre un coefficient k inférieur à la valeur préconisée par la norme européenne EN 206-1 dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5).

- Pour les additions calcaires, la valeur de k à 10 % du taux de substitution, varie de 0.3 à 0.76 et 0.53 à 0.92 pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 0.4 à 0.89 et 0.66 à 1.08 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est largement justifiée pour les additions calcaires de différentes finesses, pour les deux ciments et pour les deux modèles

prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 30 % et 40 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement.

- Pour les additions de pouzzolanes, la valeur de k à 10 % du taux de substitution, varie de 0.76 à 0.92 et 0.92 à 1.2 pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 0.9 à 1.08 et 1.1 à 1.41 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est largement justifiée pour les additions de pouzzolanes de différentes finesses, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 40 % et 50 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey, respectivement.

- Pour les additions de laitier vitrifié moulu, la valeur de k varie pour 10 % et 20 % du taux de substitution, de 1.16 à 1.25 et 1.33 à 1.28 pour les mortiers C1 et C2 dans le cas des modèles prédictifs de Féret et de 1.27 à 1.35 et 1.46 à 1.41 dans le cas des modèles prédictifs de Bolomey, respectivement. Il en résulte donc que la valeur de k est justifiée pour les additions de laitier, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Cette valeur de k reste justifiée jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les modèles de Féret et de Bolomey.

Il en résulte donc que les valeurs des facteurs d'activité qui résultent de cette étude dans le cas des mortiers avec superplastifiants sont très variables et dépendent de la nature de l'addition incorporée, ses caractéristiques granulaires, sa proportion dans le mélange, la nature du ciment utilisé, l'âge du mortier considéré et le modèle de résistance adopté. Ces facteurs sont pratiquement justifiés par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France, pour les deux ciments et pour les deux modèles prédictifs de résistance. Néanmoins le modèle de Féret, engendre un coefficient k égal à 1.9 et 1.74 pour la fumée de silice dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5), avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement. Ces valeurs sont inférieures à la valeur du facteur d'activité $k = 2.0$, préconisée par la norme européenne pour la fumée de silice avec le ciment CEM I de classe 42.5 et plus.

La corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Féret (figure VIII.13) et le modèle de résistance de Bolomey (figure VIII.14), montre que la majorité des points expérimentaux des facteurs d'activité à 28 jours, se placent légèrement à droite de la bissectrice du côté de l'axe des facteurs d'activité des mortiers avec additions et superplastifiant SP1. Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours des mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec additions, sont généralement légèrement plus importants que les facteurs d'activité des mortiers C1-SP2 et C2-SP2 avec additions, confirmant le meilleur comportement des additions avec le superplastifiant SP1. Néanmoins, certains points expérimentaux divergent de ce constat et il s'agit essentiellement des additions (Ca2,

10%), (Ca3, 10%) et (Pz1, 10 et 20%), pour le mortier C1 et (Pz1, 10%), pour le mortier C2.

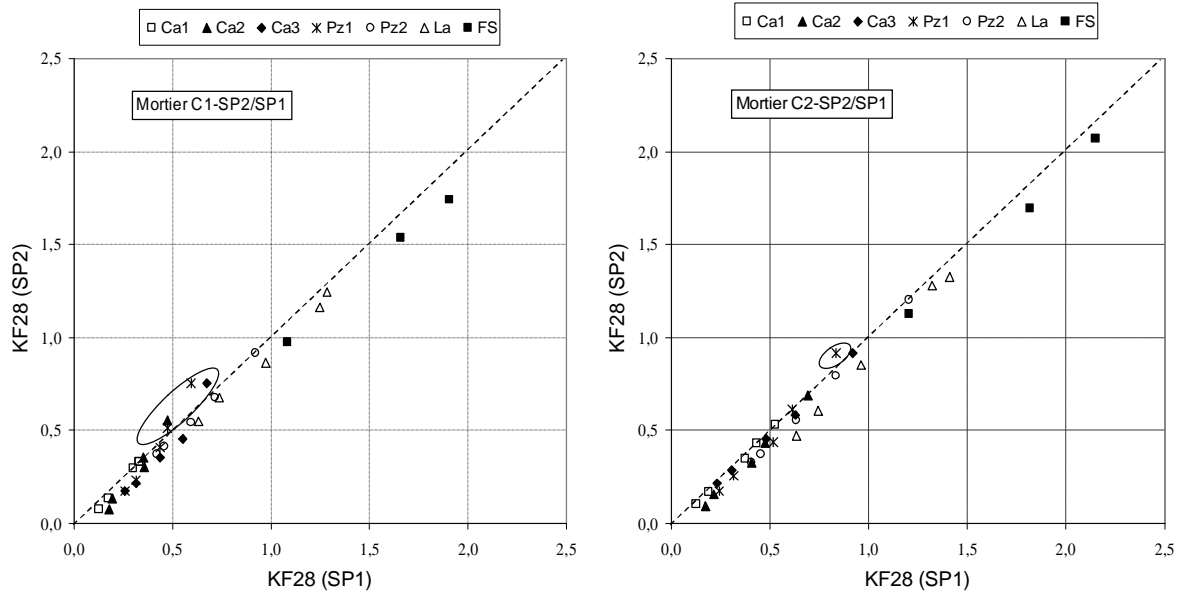


Figure VIII.13 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Féret

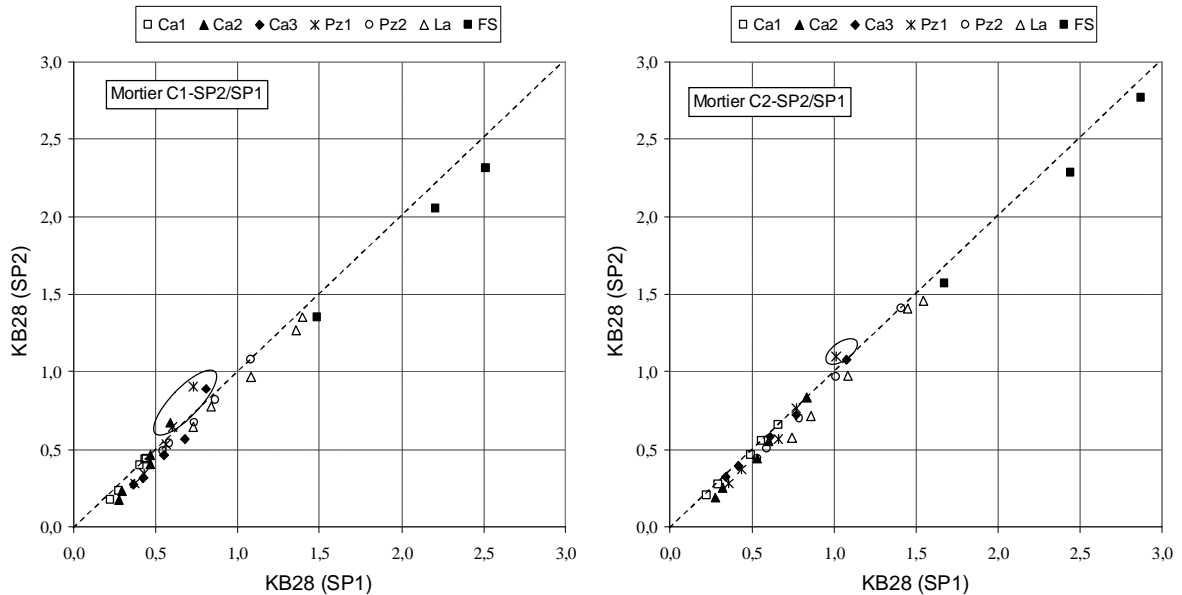


Figure VIII.14 : Corrélation (SP2/SP1), des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec additions, pour le modèle de résistance de Bolomey

Nous pouvons aussi remarquer sur les figures (VIII.13) et (VIII.14), que l'écart par rapport à la bissectrice de la majorité des points expérimentaux des facteurs d'activités des différentes additions utilisées à 28 jours est pratiquement équivalent pour les deux ciments utilisés et pour les deux modèles de résistance adoptés, ce qui montre que l'influence de la

nature du superplastifiant sur les facteurs d'activité à 28 jours est indépendante de la nature du ciment et du modèle de résistance adopté. Néanmoins, les points expérimentaux des additions de pouzzolanes et de laitier s'écartent plus de la bissectrice dans le cas du ciment C2 que dans le cas du ciment C1, ce qui suggère que le superplastifiant SP1 est plus efficace avec ces additions dans les mortiers C2.

Ces écarts peuvent être quantifiés en analysant les variations des facteurs d'activité des additions à 28 jours, notées $\Delta K_{F28}(SP2-SP1)$ et $\Delta K_{B28}(SP2-SP1)$, pour les modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux superplastifiants utilisés (figures VIII.15 et VIII.16). Les variations des facteurs d'activité des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP2-SP1)$ et $\Delta K_{B28}(SP2-SP1)$, varient pour les modèles de Féret et de Bolomey, entre -0.2 et 0.2 pour le mortier C1 avec additions et entre -0.2 et 0.1 pour le mortier C2, pour tous les taux de substitution du ciment. Cette variation est limitée dans un champ encore plus réduit pour la majorité des additions et pour tous les taux de substitution du ciment, à l'exception de quelques additions pour des taux de substitution limités, comme cela a été constaté précédemment (figures VIII.13 et VIII.14).

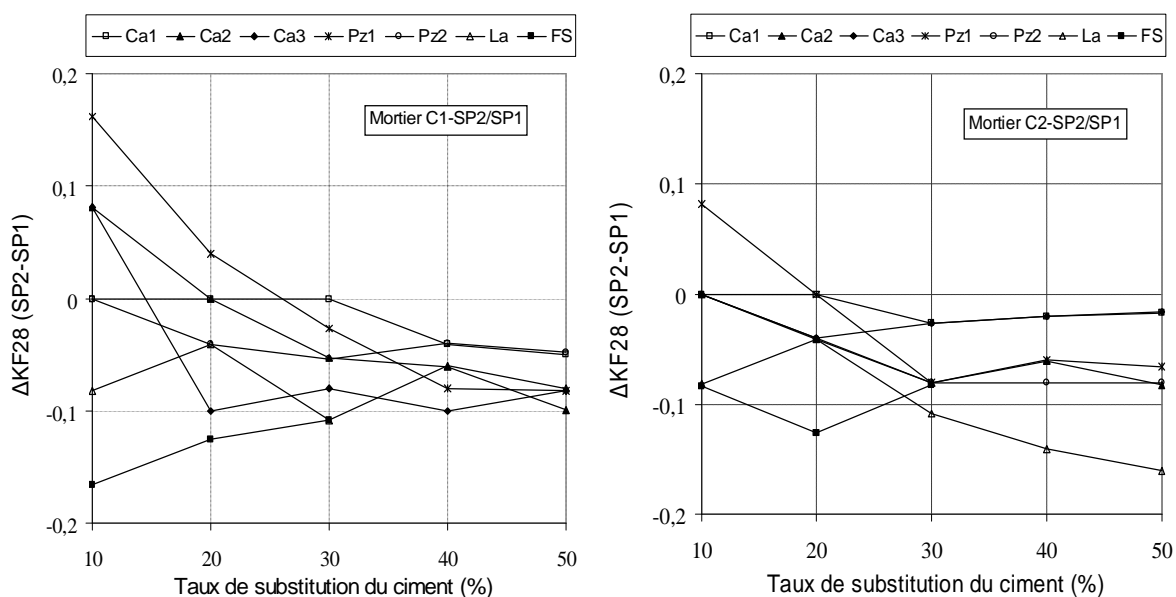


Figure VIII.15 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Féret

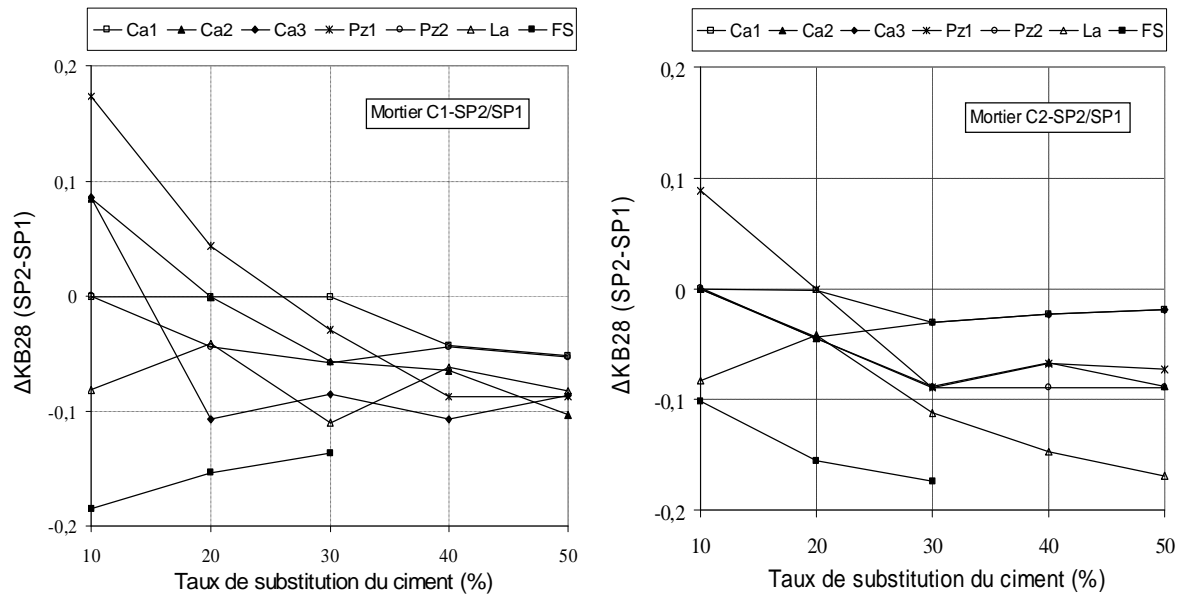


Figure VIII.16: Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours $\Delta K_{B28}(SP2-SP1)$ en fonction du taux de substitution du ciment, dans les mortiers C1 et C2, pour le modèle de Bolomey

Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont légèrement influencés par la nature du superplastifiant. Cette influence est en général indépendante de la nature du ciment et du modèle de résistance adopté.

IV. INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LES FACTEURS D'ACTIVITES DES ADDITIONS

La corrélation (C1/C2), des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2 est représentée sur les figures (VIII.17) et (VIII.18), pour les modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement. Nous pouvons constater que tous les points expérimentaux des facteurs d'activité des additions à 28 jours, avec les deux superplastifiants SP1 et SP2, se placent à gauche de la bissectrice du côté de l'axe des facteurs d'activité des mortiers C2, quelque soit le modèle de résistance adopté. Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants avec le ciment C2 qu'avec le ciment C1. Néanmoins, certains points expérimentaux divergent de ce constat et il s'agit essentiellement des additions (La, 40% et 50%) et (Pz2, 40% et 50%), avec superplastifiant SP2.

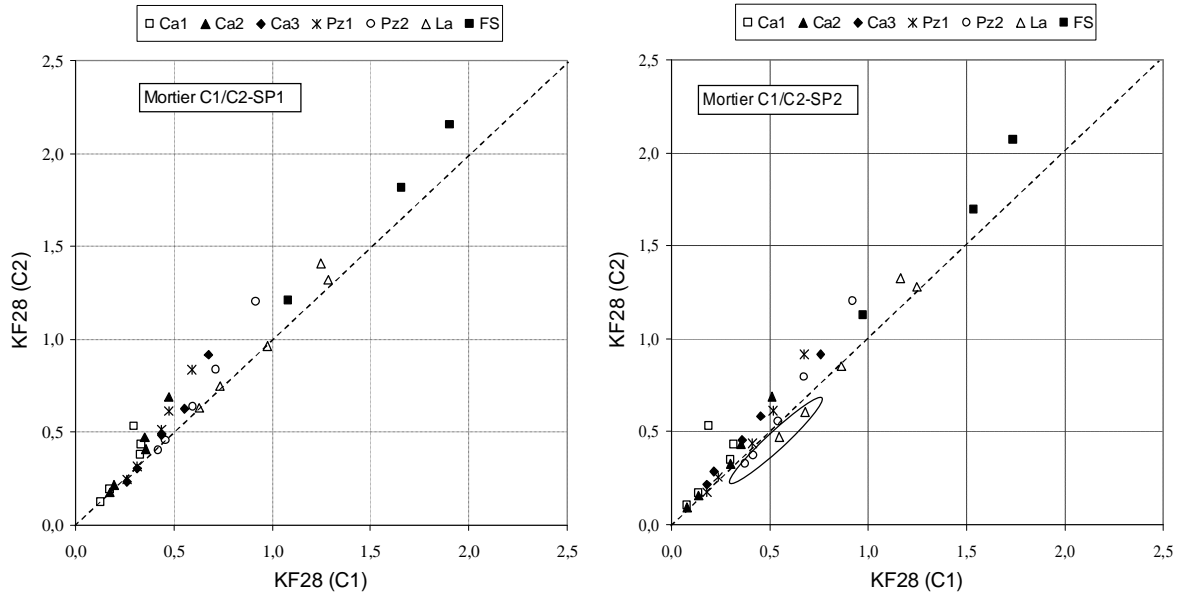


Figure VIII.17 : Corrélation (C1/C2), des facteurs d’activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2, avec superplastifiants SP1 et SP2, pour le modèle de Féret

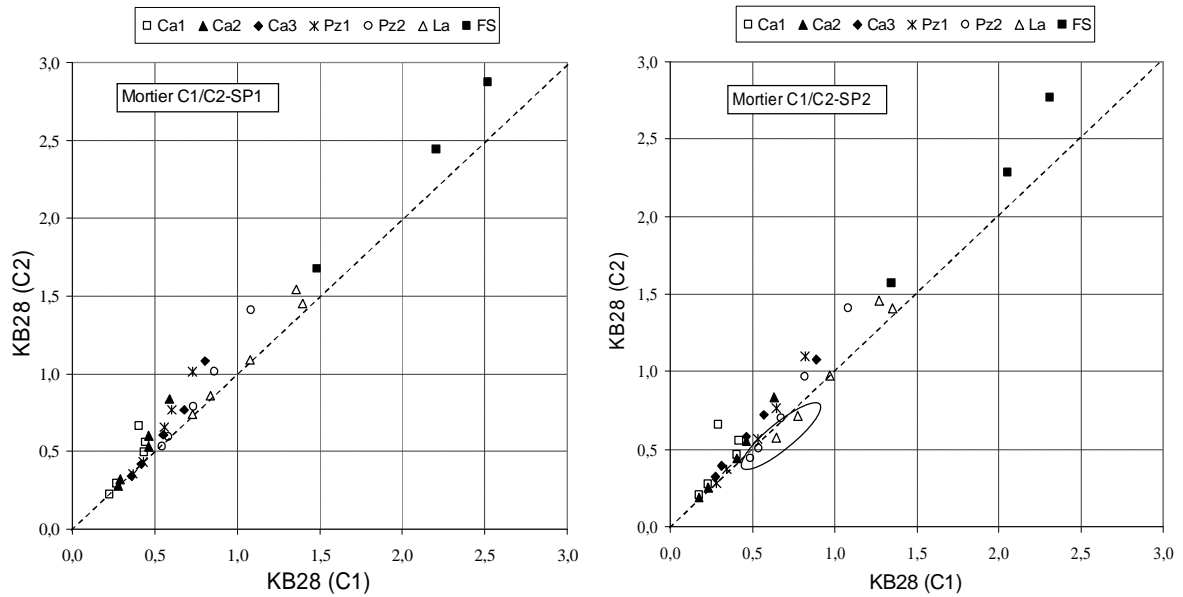


Figure VIII.18 : Corrélation (C1/C2), des facteurs d’activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2, avec superplastifiants SP1 et SP2, pour le modèle de Bolomey

Les figures (VIII.17) et (VIII.18), montrent bien que les facteurs d’activité des additions à 28 jours sont plus importants pour le modèle de Bolomey que pour le modèle de Féret. Les écarts des points expérimentaux par rapport à la bissectrice est plus visible en général pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions, mais tend à se réduire pour les forts taux de substitution.

Les écarts entre les facteurs d'activité des additions dans les mortiers C1 et C2, peuvent être quantifiés en analysant les variations des facteurs d'activité des additions à 28 jours, $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions, dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2 (figures VIII.19 et VIII.20), pour les modèles de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement.

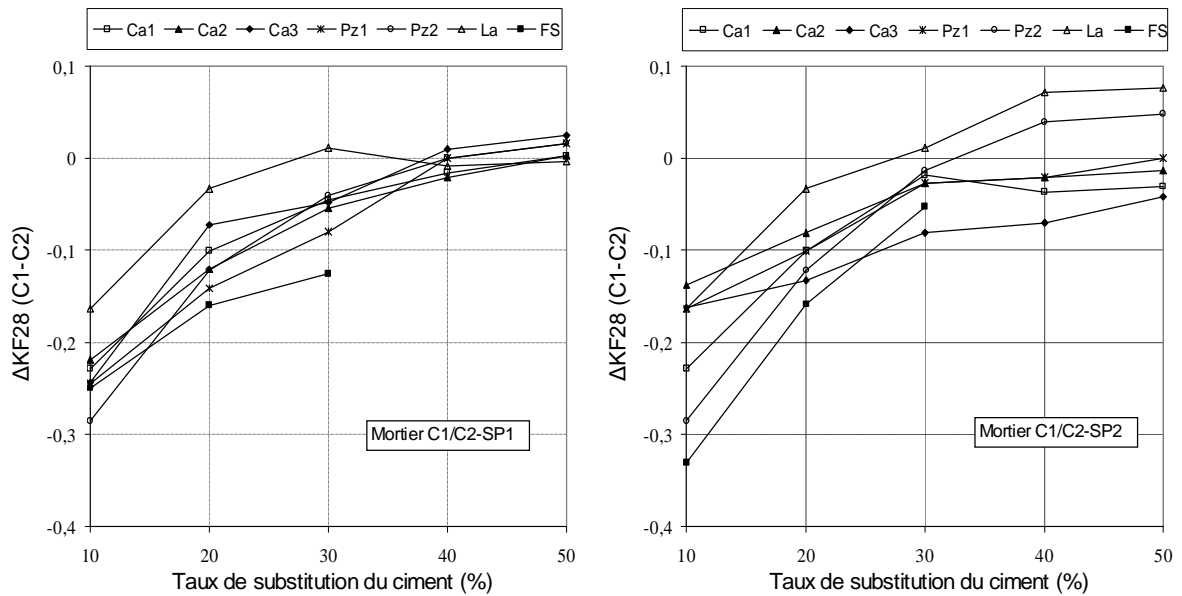


Figure VIII.19 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour le modèle de Féret

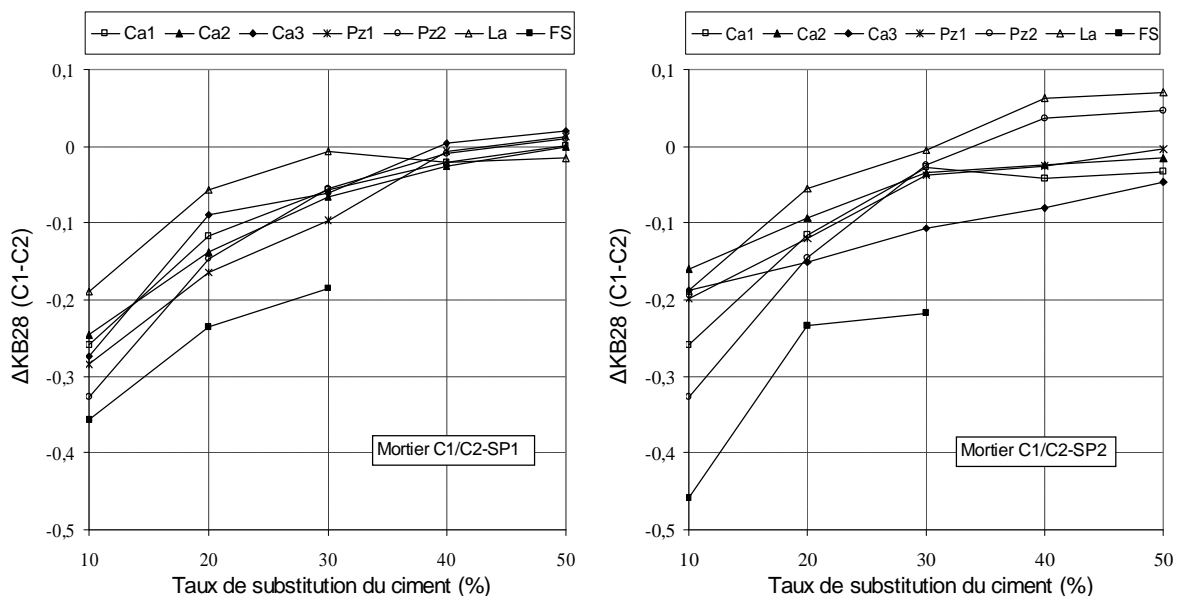


Figure VIII.20 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants SP1 et SP2, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, pour le modèle de Bolomey

Nous pouvons confirmer que les variations des facteurs d'activité à 28 jours, $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$, sont en général négatives, à l'exception de quelques additions à forts taux de substitution du ciment avec le superplastifiant SP2. Ceci confirme que les additions présentent globalement des facteurs d'activité à 28 jours légèrement plus forts avec le ciment C2 qu'avec le ciment C1.

En général, ces variations sont d'autant plus faibles en valeur absolue que la quantité d'addition dans le mélange est grande, pour toutes les additions, avec les deux superplastifiants utilisés et quelque soit le modèle de résistance adopté. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la variation des facteurs d'activité à 28 jours des additions fines décroît au fur et à mesure de l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, aux dépens de la quantité du ciment.

Les variations $\Delta K_{F28}(C1-C2)$ et $\Delta K_{B28}(C1-C2)$ des additions étudiées, se situent à faibles taux de substitution du ciment, entre -0,46 et 0 MPa pour les deux superplastifiants utilisés et pour les deux modèles de résistance adoptés. Ceci suggère que la nature du ciment modifie l'activité chimique des additions à 28 jours; ceci étant plus vrai pour la fumée de silice. Néanmoins, il est à retenir le comportement particulier des additions de laitier et de pouzzolane (Pz2), à forts taux de substitution du ciment.

Il en résulte donc que la nature du ciment peut influencer l'activité chimique des additions à 28 jours. Cette influence est plus visible à faibles taux de substitution du ciment et particulièrement pour la fumée de silice.

V. INFLUENCE DU MODELE PREDICTIF DE RESISTANCE SUR LE CALCUL DES FACTEURS D'ACTIVITES DES ADDITIONS

L'influence du modèle de résistance sur le calcul des facteurs d'activité à 28 jours, des mortiers C1 et C2, peut être analysée en représentant la corrélation (K_B/K_F) des facteurs d'activité des mortiers C1 et C2, calculés à partir des modèles de résistance de Féret (KF) et de Bolomey (KB), avec les superplastifiants SP1 (figure VIII.21) et SP2 (figure VIII.22). Nous pouvons remarquer que tous les points expérimentaux des facteurs d'activité à 28 jours des mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 et SP2, calculés à partir du modèle de Féret et du modèle de Bolomey, se placent à gauche de la bissectrice du côté de l'axe des facteur d'activité calculés à partir du modèle de Bolomey. Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey sont toujours plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret, quelque soient les natures du ciment et du superplastifiant utilisés. En général, l'écart des points expérimentaux des facteurs d'activité des additions à 28 jours, par rapport à la bissectrice est minime pour toutes les additions à l'exception de la fumée de silice (addition ultrafine).

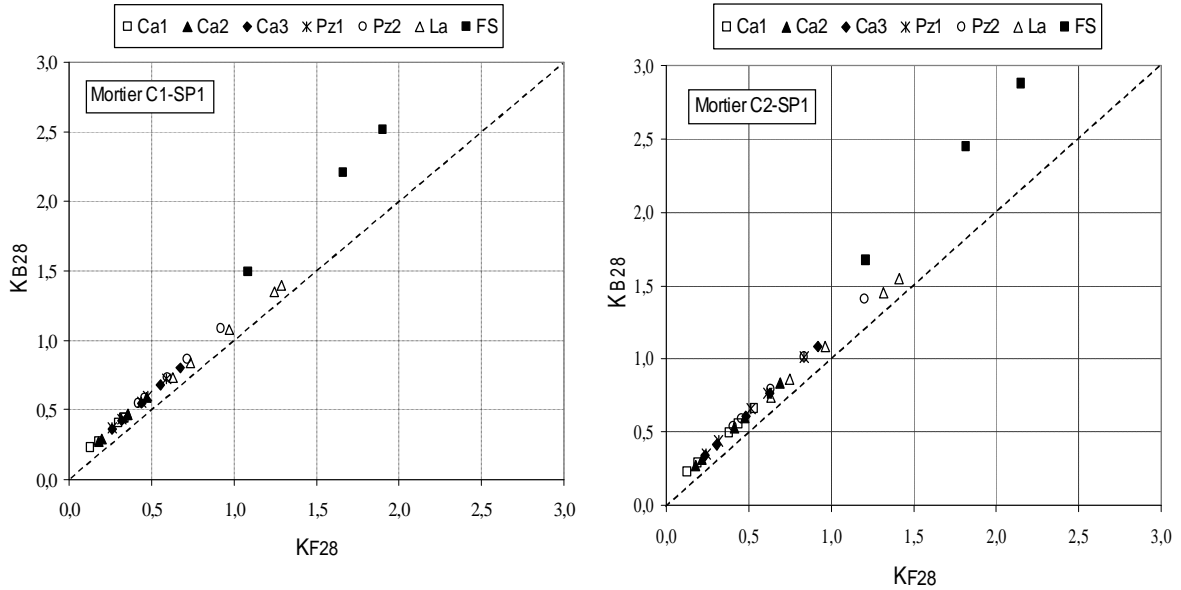


Figure VIII.21 : Corrélation (K_B/K_F), entre les facteurs d'activités chimiques des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Féret et de Bolomey dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP1

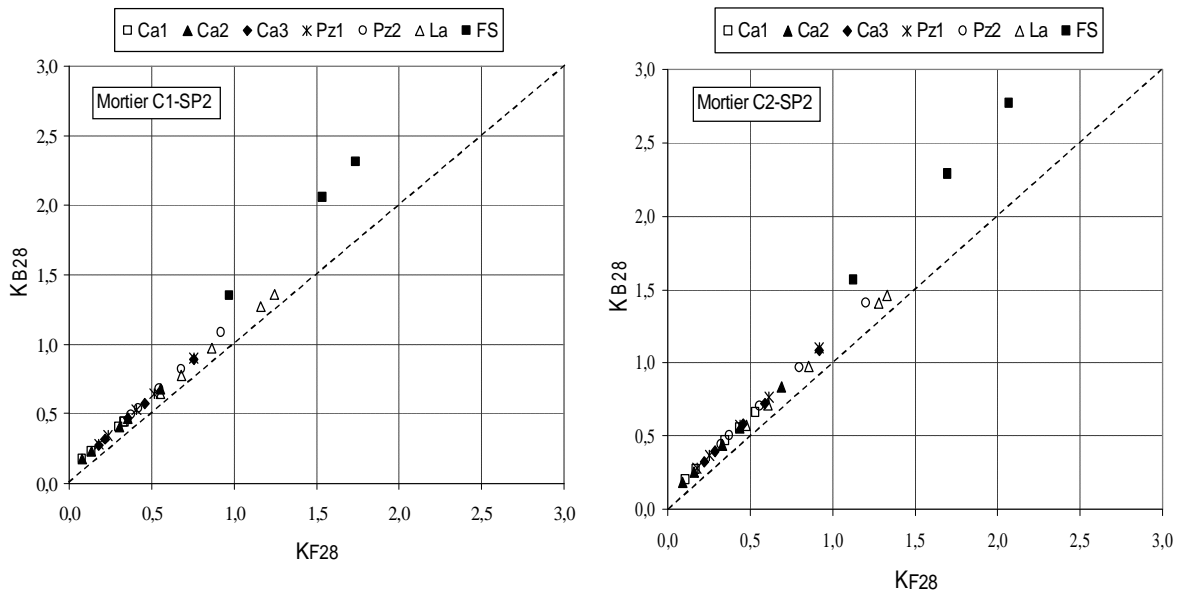


Figure VIII.22 : Corrélation (K_B/K_F), entre les facteurs d'activités chimiques des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Féret et de Bolomey dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2

Ces écarts peuvent être quantifiés en analysant la variation $\Delta(K_{B28}-K_{F28})$, qui représente l'écart entre les valeurs des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Bolomey et de Féret pour les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiants SP1 (figure VIII.23) et SP2 (figure VIII.24).

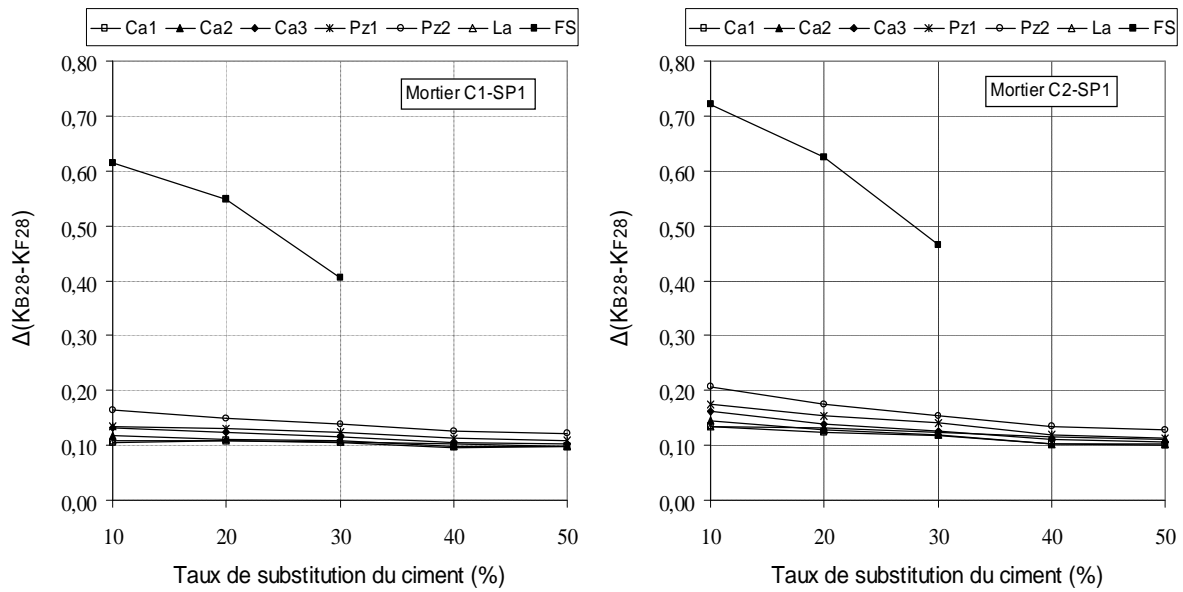


Figure VIII.23 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta(K_{B28}-K_{F28})$, dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP1

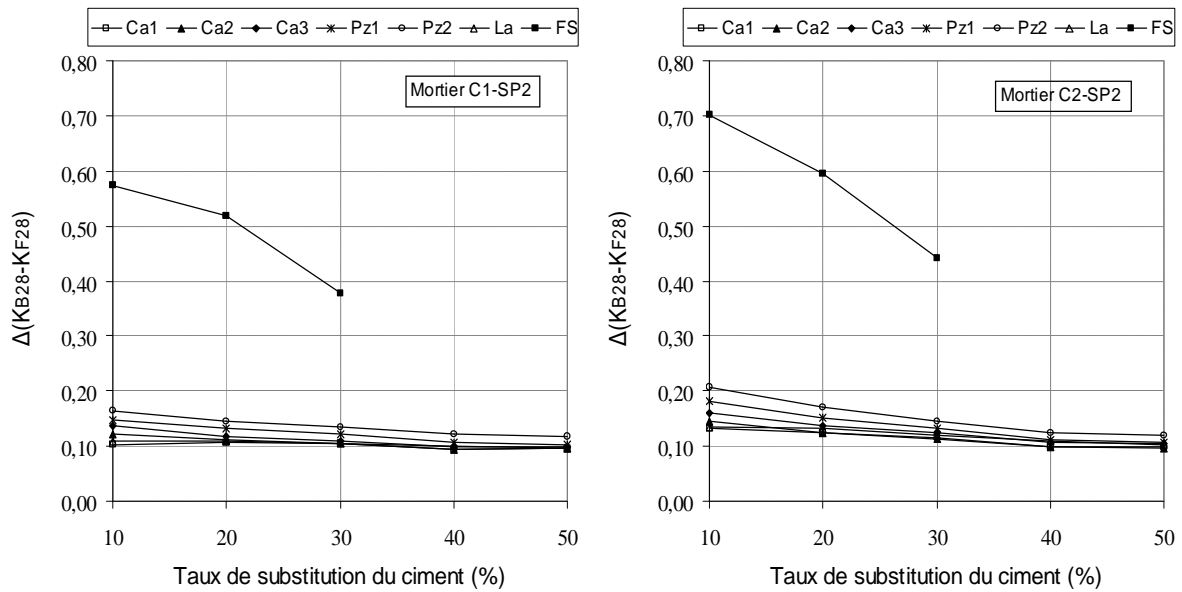


Figure VIII.24 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta(K_{B7}-K_{F7})$, dans les mortiers C1 et C2 avec additions et superplastifiant SP2

Nous remarquons que la variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir des modèles de Bolomey et de Féret est toujours positive, ce qui confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours, calculés à partir du modèle de Bolomey sont toujours plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret, quelque soient les natures du ciment et du superplastifiant utilisés.

D'autre part, nous pouvons constater que cette variation se limite dans un intervalle très réduit pour toutes les additions utilisées à l'exception de la fumée de silice (addition ultrafine) qui se caractérise par des écarts plus significatifs qui atteignent pour les mortiers C1 et C2 respectivement, 0.61 et 0.72 pour le superplastifiant SP1 et 0.57 et 0.7 pour le superplastifiant SP2 ; ce qui confirme le constat fait auparavant (figures VIII.21 et VIII.22).

Nous pouvons donc déduire que les facteurs d'activité des additions minérales de finesse inférieure à 8500 cm²/g sont peu influencés par le modèle de résistance adopté ; par contre les facteurs d'activité calculés pour la fumée de silice sont plus importants dans le cas du modèle de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret, dont la précision paraît plus fiable. Ces résultats rejoignent les conclusions émises dans le cas des mortiers avec additions sans superplastifiants.

VI. INFLUENCE DE LA FINESSE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES FACTEURS D'ACTIVITÉS CHIMIQUES

L'influence de la finesse des additions minérales sur les facteurs d'activité chimique des additions a été étudiée pour les trois additions calcaires et les deux additions pouzzolanes de finesse différentes. Comme, nous avons vu que les facteurs d'activité des additions minérales de finesse inférieure à 8500 cm²/g sont peu influencés par le modèle de résistance adopté, nous représentons sur les figures (VIII.25) et (VIII.26), la variation des facteurs d'activité chimique des additions à 28 jours en fonction de la finesse Blaine en (cm²/g) pour les différents taux de substitution du ciment par l'addition, pour les deux ciments utilisés avec les superplastifiants SP1 et SP2, respectivement, dans le cas du modèle de résistance de Féret uniquement.

Nous remarquons que la variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours est fortement influencée par la nature, la finesse et la quantité de l'addition dans le mélange. Le comportement global de ces facteurs en fonction de la finesse Blaine, est similaire pour les deux mortiers C1 et C2 avec additions, à l'exception des additions calcaires à 10 % et 20 % du taux de substitution du ciment.

D'une manière générale, nous pouvons noter que pour une addition donnée et une finesse donnée, le facteur d'activité de l'addition à 28 jours est toujours plus important pour le ciment C2 que pour le ciment C1.

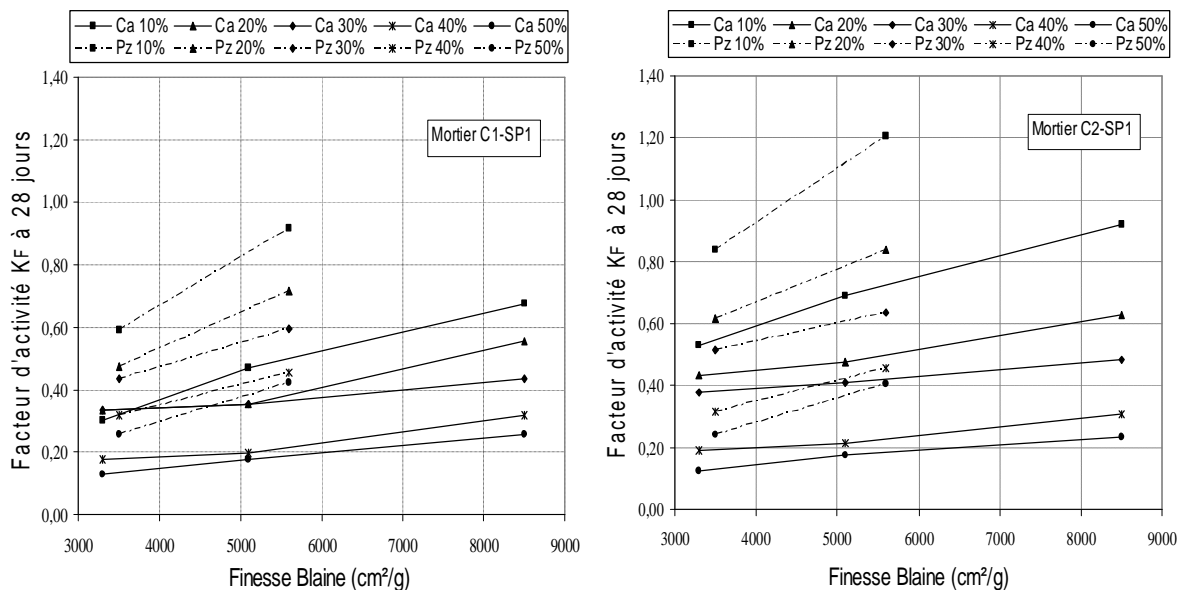


Figure VIII.25 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 et superplastifiant SP1, pour le modèle de résistance de Féret

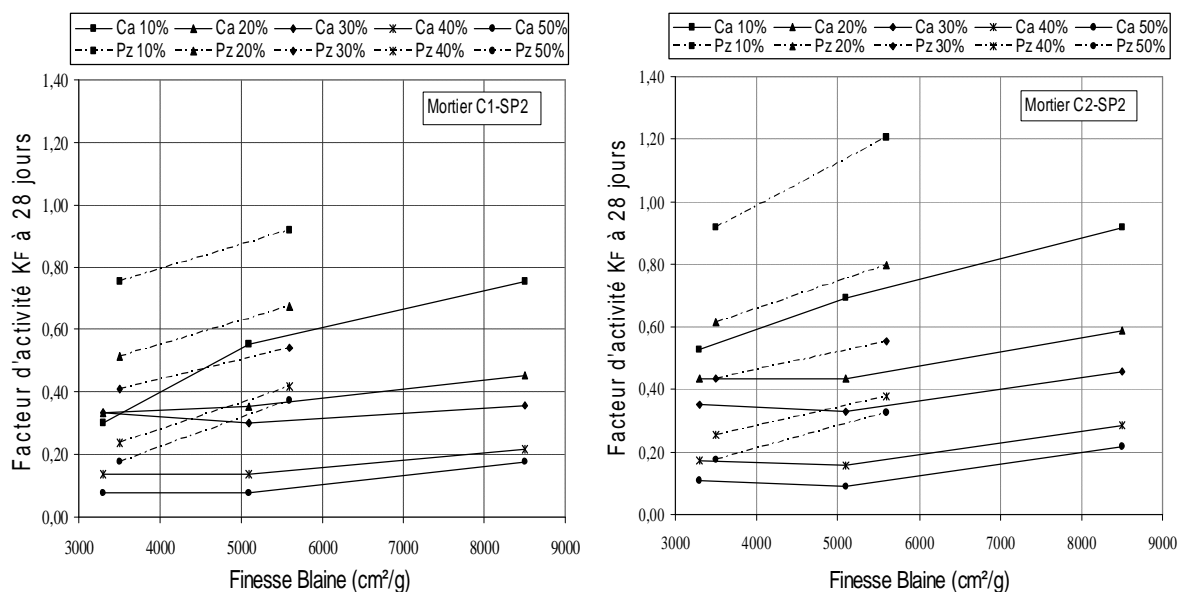


Figure VIII.26 : Variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, dans les mortiers C1 et C2 et superplastifiant SP2, pour le modèle de résistance de Féret

Dans le cas du superplastifiant SP1, les facteurs d'activité des additions calcaires et de pouzzolanes à 28 jours sont d'autant plus importants que la finesse des particules est grande pour tous les taux de substitution du ciment par l'addition. Ce comportement est plus prononcé pour les additions de pouzzolanes ; néanmoins, les additions calcaires à 10 % et 20 % du taux de substitution du ciment, présentent un comportement particulier avec le ciment C1.

Dans le cas du superplastifiant SP2, le comportement diffère légèrement et devient moins régulier pour les additions calcaires. A 10 % du taux de substitution du ciment, le facteur d'activité des additions calcaires à 28 jours, est d'autant plus important que la finesse des particules est grande. Pour les autres taux de substitution, ce facteur reste pratiquement constant jusqu'à une finesse de 5100 cm²/g, puis croît pour les finesesses plus importantes. Pour les additions de pouzzolane, la variation des facteurs d'activité des additions à 28 jours est plus régulière, elle est d'autant plus croissante que la finesse des particules est grande pour tous les taux de substitution du ciment par l'addition.

Pour des finesesses proches, les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants pour les additions de pouzzolanes que pour les additions calcaires, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la quantité des additions dans le mélange est faible et la finesse de l'addition est grande. Ceci confirme la réduction de l'effet chimique des additions calcaires à 28 jours et la déclaration de l'effet pouzzolanique des additions de pouzzolanes qui est d'autant plus important que la finesse est grande.

Nous pouvons donc déduire que les facteurs d'activité des additions étudiées sont beaucoup influencés par la finesse des particules. Cette influence dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, quelques soient les natures du ciment et du superplastifiant. Ces variations sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment est faible. Pour les additions calcaires, le comportement des additions est plus irrégulier. Une plus grande finesse des particules peut engendrer soit un maintien ou une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition. Ce comportement irrégulier est probablement dû à la sensibilité du processus d'hydratation du liant aux additions calcaires et à leur finesse.

VII. CORRELATION DES FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS DANS LES MORTIERS AVEC ET SANS SUPERPLASTIFIANTS

VII.1. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS CALCULES À PARTIR MODELE DE RESISTANCE DE FÉRET

La corrélation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants (SP) et sans superplastifiants (SSP) peut être représentée pour le modèle de résistance de Féret, par les figures (VIII.27) et (VIII.28), dans le cas du superplastifiant SP1 et SP2, respectivement.

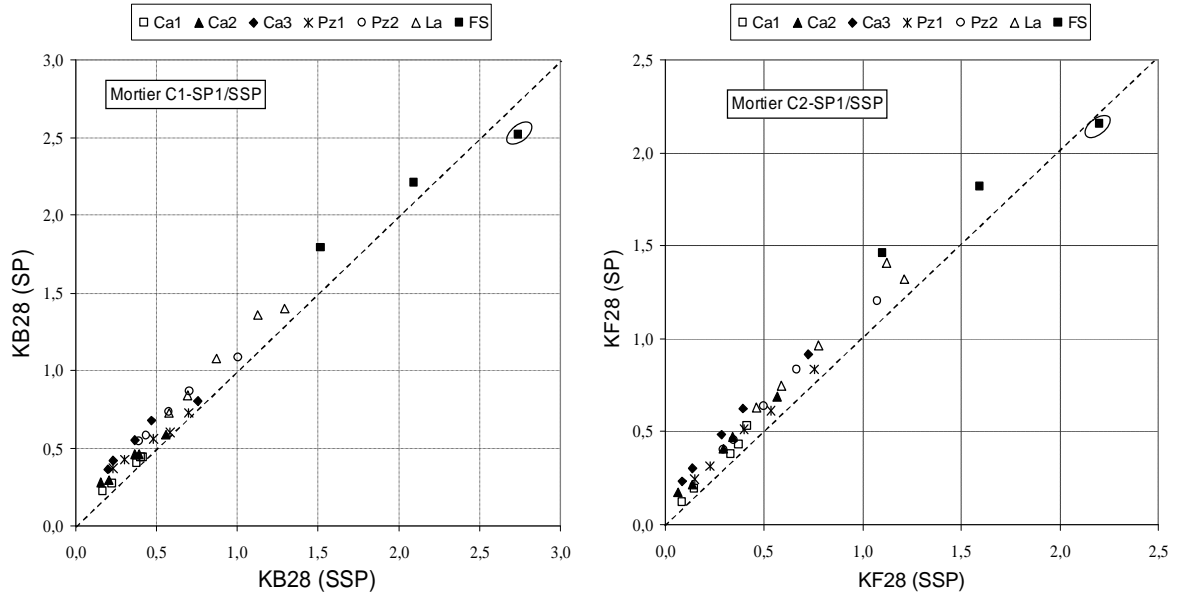


Figure VIII.27: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiant, pour le modèle de Féret

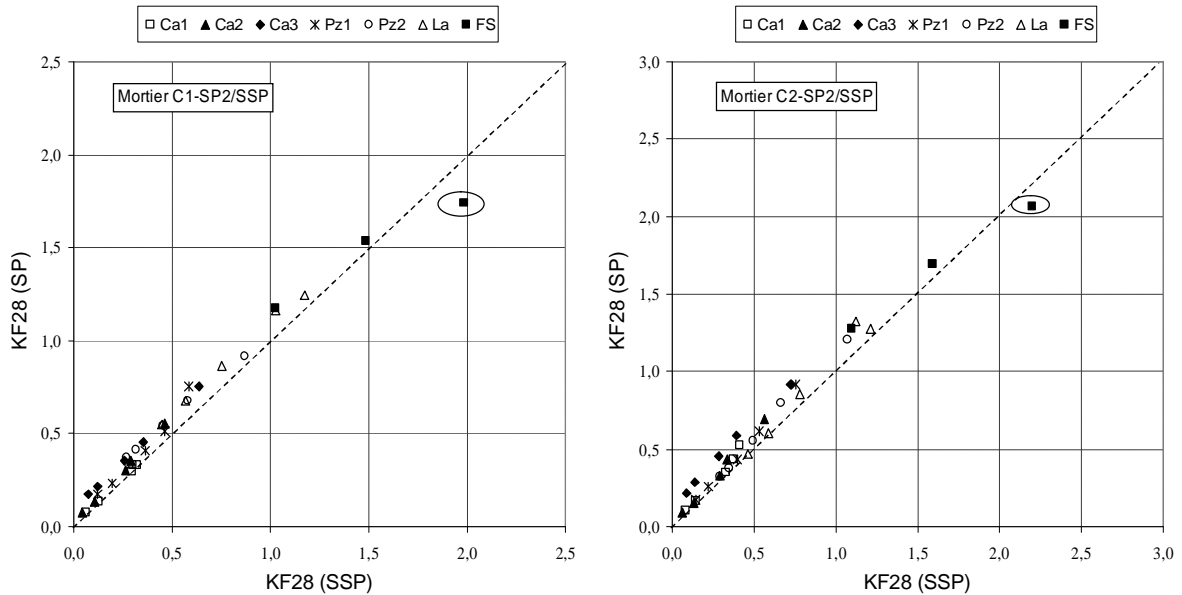


Figure VIII.28: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiant, pour le modèle de Féret

Nous pouvons constater que la majorité des points expérimentaux des facteurs d'activité à 28 jours des additions, avec les deux superplastifiants SP1 et SP2, se placent à gauche de la bissectrice du côté de l'axe des facteurs d'activité des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 ou SP2. Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants en présence des superplastifiants SP1 et SP2, pour les deux ciments utilisés. Les points expérimentaux de la fumée de silice à 10 % du taux de

substitution du ciment divergent de ce constat, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés, ce qui montre dans ce cas, que la réduction de la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires avec superplastifiants réduit l'activité de la fumée de silice à 28 jours, qui probablement nécessite une quantité d'eau plus importante pour activer son hydratation.

On peut également noter que les facteurs d'activité des additions à 28 jours s'écartent plus à gauche de la bissectrice dans le cas du superplastifiant SP1 que SP2, ce qui confirme la meilleure activité des additions à 28 jours en présence du superplastifiant SP1 qu'en présence du superplastifiant SP2.

Cet écart peut être quantifié en analysant la variation $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, qui représente l'écart entre les valeurs des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour le modèle de Féret, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 ou SP2 (SP) et sans superplastifiants (SSP) (figures VIII.29 et VIII.30), respectivement.

Nous remarquons que la variation $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$ pour toutes les additions utilisées est toujours positive, à l'exception de la fumée de silice à 10 % du taux de substitution du ciment. Ceci qui confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours, sont toujours plus forts en présence des superplastifiants SP1 ou SP2, pour les deux ciments utilisés ; l'exception est faite pour la fumée de silice à 10 % du taux de substitution du ciment.

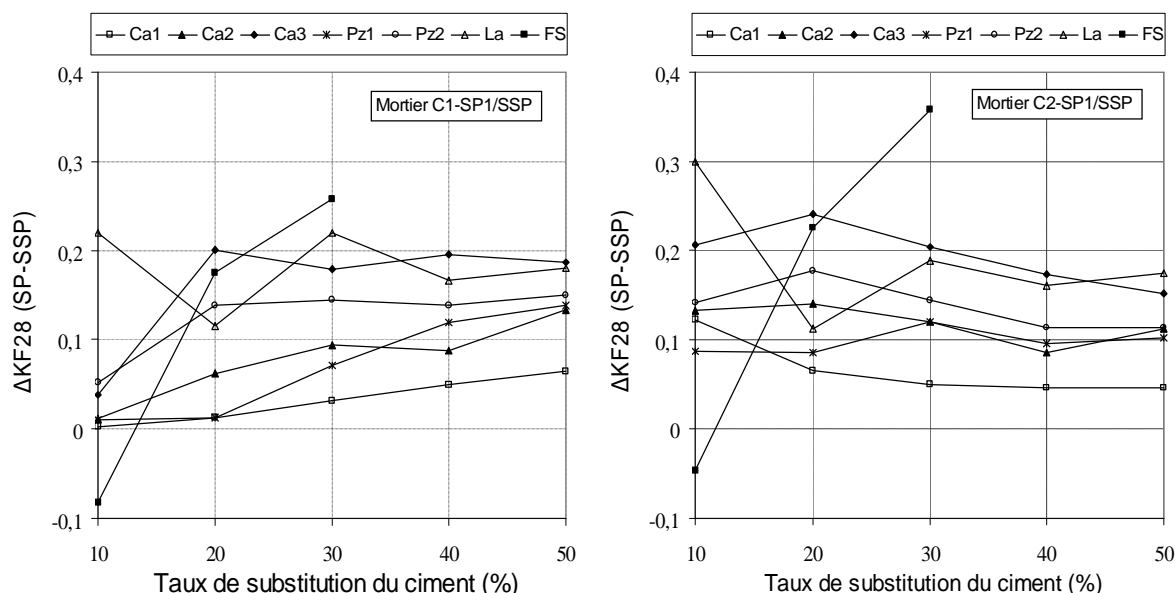


Figure VIII.29 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Féret, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiants

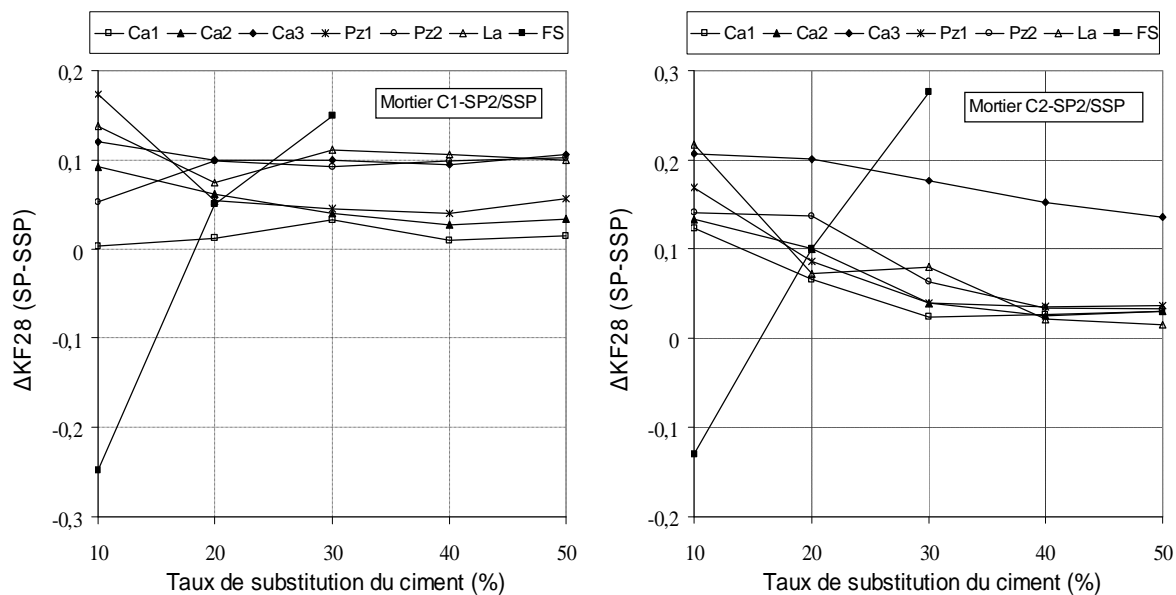


Figure VIII.30 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Féret, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiants

Pour les additions fines de calcaires, de pouzzolanes, cette variation ne suit pas un comportement régulier et varie pour les ciments C1 et C2, dans des intervalles entre 0 et 0.25, dans le cas du superplastifiant SP1 et entre 0 et 0.2 dans le cas du superplastifiant SP2. Pour les additions fines de laitier, cette variation ne suit pas un comportement régulier et varie pour les ciments C1 et C2, dans des intervalles entre 0.1 et 0.3, dans le cas du superplastifiant SP1 et entre 0 et 0.2 dans le cas du superplastifiant SP2. Pour la fumée de silice, cette variation est d'autant plus croissante que la quantité de fumée de silice est grande ; elle varie pour les ciments C1 et C2, dans des intervalles entre -0.1 et 0.4, dans le cas du superplastifiant SP1 et entre -0.25 et 0.3, dans le cas du superplastifiant SP2.

VII.2. FACTEURS D'ACTIVITE DES ADDITIONS CALCULES À PARTIR MODELE DE RESISTANCE DE BOLOMEY

La corrélation des facteurs d'activité des additions à 28 jours dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiants (SP) et sans superplastifiants (SSP) peut être représentée pour le modèle de résistance de Bolomey, par les figures (VIII.31) et (VIII.32), dans le cas du superplastifiant SP1 et SP2, respectivement.

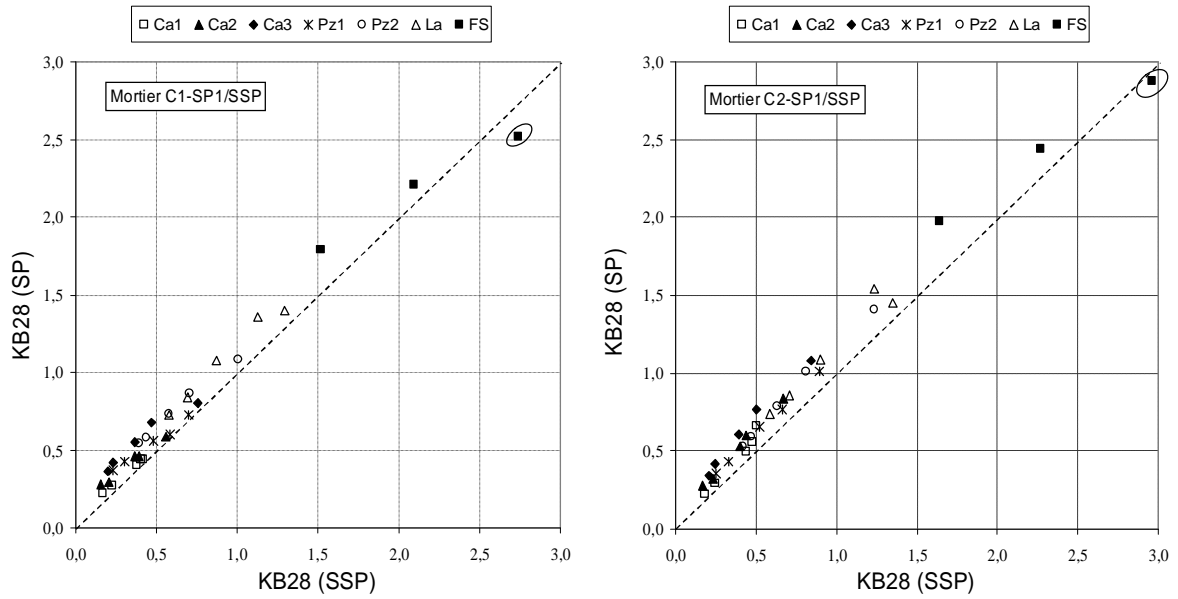


Figure VIII.31: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiant, pour le modèle de Bolomey

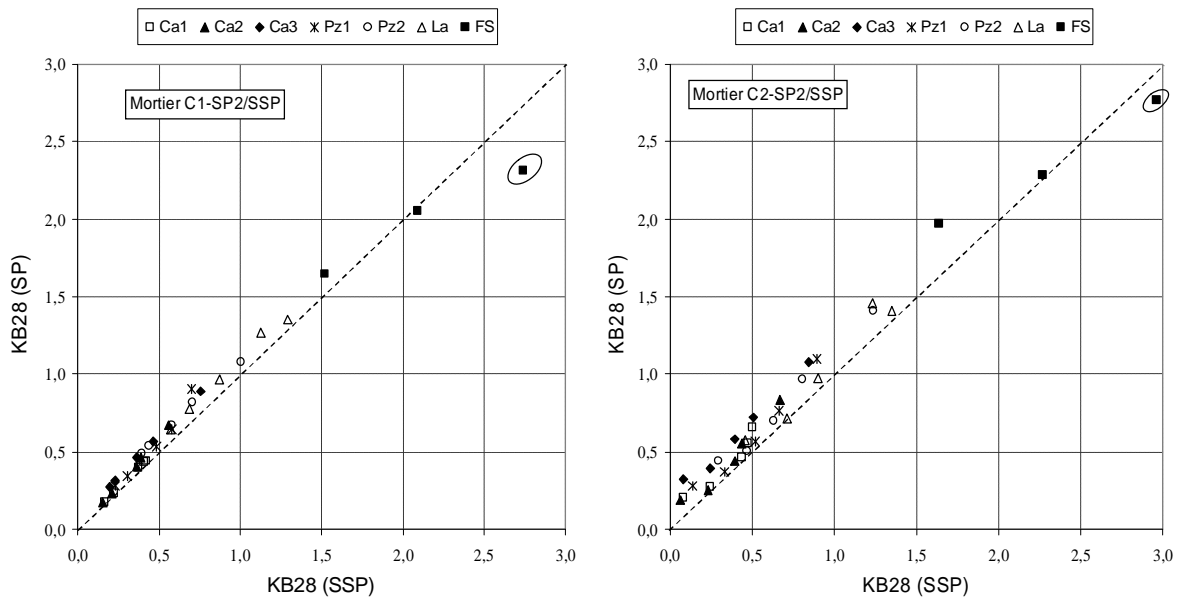


Figure VIII.32: Corrélation (SP/SSP) des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiant, pour le modèle de Bolomey

Nous pouvons constater que le comportement global des facteurs d'activité à 28 jours est identique pour les deux modèles de résistance adoptés, quelque soient les natures des ciments et des superplastifiants utilisés. la majorité des points expérimentaux des facteurs d'activité à 28 jours des additions, avec les deux superplastifiants SP1 et SP2, se placent à

gauche de la bissectrice du côté de l'axe des facteurs d'activité des mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 ou SP2. Ceci confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont toujours plus importants en présence des superplastifiants SP1 et SP2, pour les deux ciments utilisés, quelque soit le modèle de résistance adopté.

Les points expérimentaux de la fumée de silice à 10 % du taux de substitution du ciment divergent de ce constat, pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés, ce qui confirme, que l'activité de la fumée de silice à 28 jours se déclare mieux en l'absence des superplastifiants avec une plus grande quantité d'eau dans le mélange.

On peut noter également que les facteurs d'activité des additions à 28 jours s'écartent plus à gauche de la bissectrice dans le cas du superplastifiant SP1 que SP2, ce qui confirme la meilleure activité des additions à 28 jours en présence du superplastifiant SP1 qu'en présence du superplastifiant SP2.

Ces écarts peuvent être quantifiés en analysant la variation $\Delta K_{B28}(SP-SSP)$, qui représente l'écart entre les valeurs des facteurs d'activité des additions à 28 jours pour le modèle de Bolomey, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 ou SP2 (SP) et sans superplastifiants (SSP) (figures VIII.33 et VIII.34), respectivement. Nous remarquons que la variation $\Delta K_{B28}(SP-SSP)$ pour toutes les additions utilisées est toujours positive, à l'exception de la fumée de silice à 10 % du taux de substitution du ciment. Ceci qui confirme que les facteurs d'activité des additions à 28 jours, sont toujours plus forts en présence des superplastifiants SP1 ou SP2, pour les deux ciments utilisés ; l'exception est faite pour la fumée de silice à 10 % du taux de substitution du ciment.

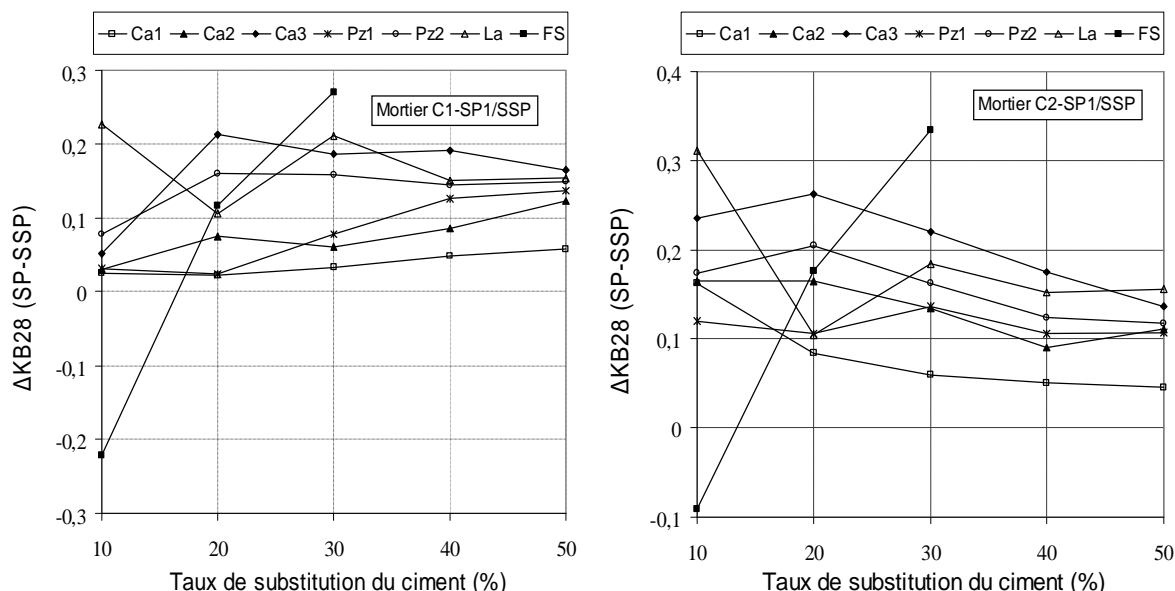


Figure VIII.33 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Bolomey, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP1 et sans superplastifiants

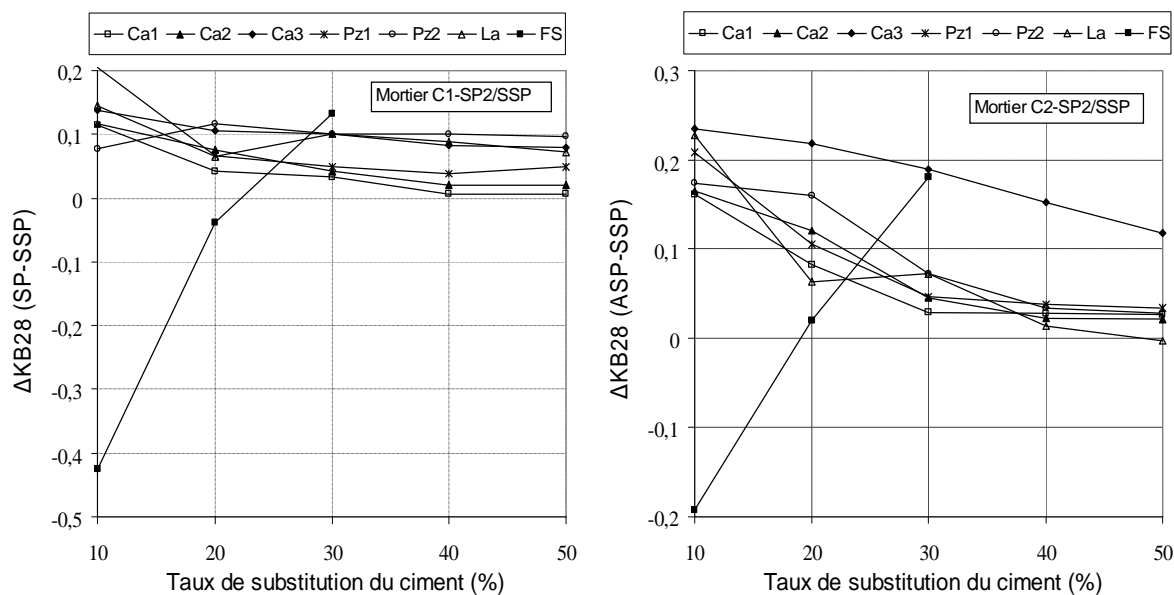


Figure VIII.34 : Variation des facteurs d'activités des additions à 28 jours $\Delta K_{F28}(SP-SSP)$, pour le modèle de Bolomey, dans les mortiers C1 et C2 avec superplastifiant SP2 et sans superplastifiants

Pour les additions fines de calcaires, de pouzzolanes, cette variation ne suit pas un comportement régulier et varie pour les ciments C1 et C2, dans des intervalles entre 0 et 0,25, dans le cas des superplastifiants SP1 et SP2. Pour les additions fines de laitier, cette variation ne suit pas un comportement régulier et varie pour les ciments C1 et C2, dans des intervalles entre 0,1 et 0,3, dans le cas des superplastifiants SP1 et SP2. Pour la fumée de silice, cette variation est d'autant plus croissante que la quantité de fumée de silice est grande ; elle varie pour les ciments C1 et C2, dans des intervalles entre -0,25 et 0,35, dans le cas du superplastifiant SP1 et entre -0,45 et 0,2, dans le cas du superplastifiant SP2.

Nous pouvons donc déduire que les facteurs d'activité des additions minérales de finesses inférieure à 8500 cm^2/g sont toujours plus importants en présence des superplastifiants SP1 et SP2, qu'en l'absence de superplastifiants. L'écart peut atteindre 0,25 pour les additions calcaires et pouzzolanes classées comme additions du type I selon la norme européenne EN 206-1 et 0,3 pour les additions de laitier classées comme additions du type II selon la norme européenne EN 206-1. La fumée de silice (addition ultrafine), classée comme additions du type II selon la norme européenne EN 206-1, présente un comportement particulier et les facteurs d'activité à 28 jours sont plus importants en l'absence de superplastifiants à 10 % du taux de substitution du ciment, pour lesquels, l'écart peut atteindre 0,25 et 0,45 pour le cas du modèle de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement.

VIII. SYNTHÈSE

A fin de permettre une évaluation plus précise de l'activité chimique des additions minérales utilisées, nous avons :

- Introduit les additions dans le mélange en substitution volumique du ciment pour garantir le maintien du volume absolu des constituants solides,
- maintenu constante la consistance du mélange frais pour garantir une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire pour toutes les formulations,
- maintenu la quantité d'eau constante pour toutes les formulations étudiées pour garantir le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état. Ceci a été possible par l'utilisation d'adjuvants fluidifiants conformes à la norme NF EN 934-2.

Dans ce cas, la porosité initiale et le volume de la matrice cimentaire des mortiers restent constants indépendamment du caractère et de l'intensité de l'effet granulaire des additions.

En appliquant aux mortiers avec adjuvants fluidifiants les principes des modèles prédictifs de Féret et de Bolomey, et en se basant sur la notion de liant équivalent définie par les règles EN 206-1 ; les facteurs d'activité K_F et K_B ont été évalués en considérant que la porosité initiale (e_r+v_r) du mortier de référence reste inchangée pour toutes les formulations de mortier avec additions et adjuvants fluidifiants, car la quantité d'eau utilisée dans le mélange est constante et le serrage et le volume d'air qui en résultent sont similaires.

L'analyse de la variation des coefficients d'activité K_F et K_B en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition a pu informer sur l'activité chimique propre à chaque addition étudiée.

Pour les mortiers avec additions et superplastifiants, les facteurs d'activité chimiques des additions à 07 jours et 28 jours, pour les mortiers C1 et C2 avec le superplastifiant SP1, présentent un comportement similaire en fonction des taux de substitution du ciment par les additions, à celui des mortiers avec additions sans superplastifiants. Les valeurs des facteurs d'activité dans ce cas, sont très variables et dépendent de la nature de l'addition incorporée, ses caractéristiques granulaires, sa proportion dans le mélange, la nature du ciment utilisé, l'âge du mortier considéré et le modèle de résistance adopté.

Les résultats avancés pour les facteurs d'activité des additions à 07 jours et 28 jours dans les mortiers avec additions et superplastifiants, rejoignent les conclusions avancées précédemment pour les mortiers avec additions sans superplastifiants. Néanmoins, il est à noter que les facteurs d'activité des additions utilisées (Ca1, Ca2, Ca3, Pz1, Pz2 et La) à 07 jours et 28 jours, sont plus forts dans les mélanges avec superplastifiants que dans les mélanges sans superplastifiants. Ceci est probablement dû à l'amélioration du processus d'hydratation des additions par les superplastifiants au même titre que pour les ciments. En effet, Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces

inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline. Une répartition plus uniforme du ciment a pu aussi contribuer à l'amélioration du processus d'hydratation. Pour la fumée de silice, l'activité chimique se déclare mieux dans les mélanges cimentaires sans superplastifiants. Ceci est peut être du à l'influence de l'action de l'eau sur le processus d'hydratation, dont la quantité a été beaucoup plus réduite dans le cas des mortiers avec fumée de silice et superplastifiants.

L'analyse des résultats obtenus pour les facteurs d'activité des additions à 28 jours, par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France, dans le cas du superplastifiant SP1, permet de constater que les valeurs des facteurs d'activité qui résultent de cette étude sont pratiquement justifiées par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France, pour les deux ciments, pour le modèle prédictifs de Bolomey. Néanmoins le modèle de Féret, engendre un coefficient k pour la fumée de silice dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5), avec les superplastifiants SP1 et SP2, inférieur à la valeur du facteur d'activité préconisée par la norme européenne.

L'influence de la nature du superplastifiant sur les facteurs d'activité des additions, a été quantifiée en suivant les mêmes procédures pour le superplastifiants SP2. Nous avons pu montré que les facteurs d'activité des additions à 07 jours et 28 jours étaient légèrement influencés par la nature du superplastifiant. Cette influence était en général indépendante de la nature du ciment et du modèle de résistance adopté.

De même, l'influence de la nature du ciment a été quantifiée en suivant les mêmes procédures pour le ciment C2, et nous avons pu montré que le ciment pouvait modifier l'activité chimique des additions à 28 jours, mais cette influence était plus visible pour la fumée de silice.

L'influence du modèle de résistance adopté a été quantifiée en suivant les mêmes procédures pour les modèles de Féret et de Bolomey, et nous avons pu montré que les facteurs d'activité des additions minérales de finesses inférieure à $8500 \text{ cm}^2/\text{g}$ étaient peu influencés par le modèle de résistance adopté ; par contre les facteurs d'activité calculés pour la fumée de silice sont plus importants dans le cas du modèle de Bolomey que dans le cas du modèle de Féret, dont la précision paraît plus fiable. Ces résultats rejoignent les conclusions émises dans le cas des mortiers avec additions sans superplastifiants.

Les facteurs d'activité des additions calcaires et de pouzzolanes calculés à partir du modèle de Féret à 28 jours sont beaucoup influencés par la finesse des particules d'addition. Cette influence dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Pour les additions de pouzzolanes, une plus grande finesse des particules engendre une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours, quelque soit les natures du ciment et du superplastifiant. Ces variations sont d'autant plus

importantes que le taux de substitution du ciment est faible. Pour les additions calcaires, le comportement des additions est plus irrégulier. Une plus grande finesse des particules peut engendrer soit un maintien ou une augmentation des facteurs d'activité des additions à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour des finesses proches, les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants pour les additions de pouzzolanes que pour les additions calcaires, quelque soit la nature du ciment utilisé dans le mélange ; ceci est d'autant plus vrai que la quantité des additions dans le mélange est faible et la finesse de l'addition est grande.

Les facteurs d'activité des additions à 28 jours sont plus importants en présence des superplastifiants SP1 et SP2, pour les deux ciments utilisés à l'exception de la fumée de silice dont l'activité à 28 jours se déclare mieux en l'absence des superplastifiants avec une plus grande quantité d'eau dans le mélange. L'analyse de la variation $\Delta K_{28}(\text{SP-SSP})$, a permis de montrer que les facteurs d'activité des additions minérales de finesses inférieure à $8500 \text{ cm}^2/\text{g}$ sont toujours plus importants en présence des superplastifiants SP1 et SP2, qu'en l'absence de superplastifiants. L'écart peut atteindre 0,25 pour les additions calcaires et pouzzolanes classées comme additions du type I selon la norme européenne EN 206-1 et 0,3 pour les additions de laitier classées comme additions du type II selon la norme européenne EN 206-1. La fumée de silice (addition ultrafine), classée comme additions du type II selon la norme européenne EN 206-1, présente un comportement particulier et les facteurs d'activité à 28 jours sont plus importants en l'absence de superplastifiants à 10 % du taux de substitution du ciment, pour lesquels, l'écart peut atteindre 0,25 et 0,45 pour le cas du modèle de résistance de Féret et de Bolomey, respectivement.

Il en résulte donc que la maîtrise de l'effet granulaire des additions par l'utilisation des adjuvants superplastifiants pour une meilleure évaluation de l'activité chimique des additions minérales a un effet favorable sur l'activité chimique des additions fines en général. Les valeurs des facteurs d'activité à 28 jours restent justifiés par rapport à la norme européenne et ses adaptations en France jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment pour les additions calcaires (Ca1, Ca2 et Ca3), 40 % pour les additions de pouzzolanes (Pz1 et Pz2) et 30 % pour les additions de laitier (La), pour les deux ciments et les deux superplastifiants utilisés, ainsi que pour les deux modèles de résistance adoptés. La fumée de silice présente un comportement différent et les facteurs d'activité sont dans ce cas plus faibles que dans le cas des mortiers sans superplastifiants. Ce comportement est probablement dû à la forte réduction de la quantité d'eau dans les mortiers avec fumée de silice qui n'est plus suffisante pour activer l'hydratation de toutes les particules. La valeur de k à 10 % du taux de substitution du ciment, est dans ce cas, inférieure à la valeur préconisée par la norme européenne EN 206-1 dans les mortiers à base de ciment C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5), dans le cas du modèle de résistance de Féret.

UTILISATION DES ADDITIONS MINÉRALES ET DES SUPERPLASTIFIANTS DANS LES BÉTONS

I. INTRODUCTION

Les chapitres précédents ont montré que l'utilisation combinée des additions et des superplastifiants dans les mortiers peut engendrer certaines modifications sur les comportements rhéologiques et mécaniques du matériau cimentaire à l'état frais et durci. Ces modifications dépendent de plusieurs paramètres tels que, la nature du ciment, la nature, la quantité et les caractéristiques granulaires de l'addition, ainsi que de la nature du superplastifiant.

Dans ce chapitre, le principal objectif est de valider les conclusions émises pour les mortiers avec additions et superplastifiants pour les bétons. Dans ce but, nous avons utilisé la même méthodologie expérimentale appliquées aux mortiers en procédant à la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des bétons dont le volume absolu de l'ensemble des constituants solides et la consistance des mélanges sont préservés constants.

Les additions minérales retenues pour cette partie de l'étude sont celles issues des matériaux naturels ou co-produits industriels disponibles en Algérie, de faible coût, et déjà utilisées comme ajouts au ciment composé CEM II dans les différentes cimenterie du pays (additions calcaires, additions de pouzzolanes et additions de laitier).

L'étude des mortiers avec additions sans superplastifiants (chapitres III, IV et V), a montré que l'incorporation des additions minérales dans les mortiers, produisait, un effet physique lié au comportement granulaire plus ou moins défavorable, associé à une activité physico-chimique et probablement chimique des additions plus ou moins forte. Ce comportement est étroitement lié à la nature de l'addition incorporée et au taux substitution du ciment. L'effet granulaire défavorable des additions minérales sur les mortiers, a pu être maîtrisé par l'incorporation des adjuvants superplastifiants (chapitre VI). Dans le chapitre (VII), nous avons pu montrer que l'utilisation combinée des additions minérales et des superplastifiants dans les mortiers pouvait avoir un apport positif sur les résistances en compression à 28 jours, pour toutes les additions et les superplastifiants utilisés, quelque soit la nature du ciment. L'apport des additions et des superplastifiants aux résistances en compression à 28 jours pour les mortiers C1 et C2, dépend de la nature, de la quantité et de la finesse des additions dans le mélange, ainsi que des natures des ciments et des superplastifiants utilisés. Pour les additions courantes en Algérie, il a été montré que l'apport des additions minérales et des superplastifiants, par rapport au mortier de référence sans

additions et sans superplastifiants, restait favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les additions calcaires (Ca3) avec le superplastifiant SP1. Pour les additions de pouzzolanes, cet apport, restait favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution et le gain relatif maximal pouvait atteindre 16 %, à 10 % du taux de substitution du ciment pour le ciment C2 avec le superplastifiant SP1, dans le cas des additions (Pz2). Pour les mortiers avec additions de laitier, cet apport restait favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment et le gain relatif maximal pouvait atteindre 22 %, à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments C1 et C2 avec le superplastifiant SP1. L'apport aux résistances en compression à 28 jours a été expliqué en premier lieu, par la maîtrise de l'effet granulaire défavorable par l'utilisation des superplastifiants, qui se traduisait par un gain de résistance intéressant à l'image des mortiers de référence sans additions. En second lieu, il a été expliqué par l'activité chimique de l'addition même, qui concernait toutes les additions étudiées mais apportait un complément significatif au gain de résistance, dans le cas des additions classés en type II selon la norme européenne EN 206-1.

Il en résulte donc que parmi les additions calcaires et de pouzzolanes de différentes finesses, classées comme additions du type I, selon les adaptations en France de la norme européenne EN 206-1, les additions calcaires (Ca3) de finesse 8500 cm²/g et pouzzolanes (Pz2) de finesse 5600 cm²/g, pouvaient avoir un intérêt pour l'amélioration des résistances en compression des mortiers à 28 jours, à faibles taux de substitution du ciment. Cet intérêt était encore plus visible avec l'utilisation du superplastifiant SP1. Concernant les additions de laitier (La) de finesse 2900 cm²/g, classées comme additions du type II, selon les adaptations en France de la norme européenne EN 206-1, l'intérêt pour l'amélioration des résistances en compression des mortiers à 28 jours, est confirmé et est maximal à 20 % du taux de substitution. Cet intérêt était encore plus conséquent avec l'utilisation du superplastifiant SP1.

Dans ce cas, l'application des additions minérales dans les bétons sera limitée aux additions calcaires (Ca3), les additions de pouzzolanes (Pz2) et les additions de laitier (La), avec les ciments C1 (CPJ-CEM II/A 42.5) et C2 (CPA-CEM I/A 42.5) et le superplastifiant SP1 (SIKA FLUID).

II. CONFECTION DES BETONS DE REFERENCE

Les bétons de référence sans additions et sans superplastifiants ont été confectionnés en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse.

Les caractéristiques des bétons de référence pour les ciments C1 et C2, ont été définies comme suit :

- Diamètre du plus gros granulat : 25 mm,
- Affaissement au cône d'Abrams : 7 ± 0.5 cm (béton plastique),
- Résistance caractéristique exigée : $f_{c28} = 25$ MPa.

Les procédures suivies pour la préparation des bétons, l'affaissement au cône d'Abrams, la confection, des éprouvettes, le stockage, et la mesure des résistances en compression ont été réalisées conformément aux procédures décrites dans le chapitre II § V.

Les compositions théoriques des bétons de référence à base des ciments C1 et C2 obtenues par la méthode Dreux-Gorisse ont été ajustées jusqu'à la vérification des conditions d'affaissement au cône d'Abrams (7 ± 1 cm) et de résistance en compression ($f_{c28} \geq 25$ MPa), pour les deux bétons de référence.

Les compositions corrigées des bétons de référence à base des ciments C1 et C2, à même consistance et les caractéristiques rhéologiques (affaissement au cône d'Abrams) et mécaniques (résistances en compression à 07 jours et 28 jours), sont récapitulées dans le tableau (IX.1).

Tableau IX.1 : Compositions et résultats des bétons de référence à bases des ciments C1 et C2.

Béton de référence	C1	C2
Ciment (kg)	350	350
Sable 0/5 (l/m³)	422	422
Gravier 5/25 (l/m³)	243	243
Gravier 5/25 (l/m³)	519	519
Besoin en eau (l/m³)	227	222
Affaissement au cône d'Abrams (cm)	7	7
Résistance en compression Rc₇ (MPa)	12.09	11.27
Résistance en compression Rc₂₈ (MPa)	26.2	27.9

Les résultats obtenus pour les deux bétons de référence indiquent que :

- le besoin en eau du béton de référence à base du ciment C1 à même consistance est supérieur de 2.25 % par rapport à celui du béton de référence à base du ciment C2,
- la résistance en compression à 07 jours du béton de référence à base du ciment C1 est supérieure de 7 % par rapport à celle du béton de référence à base du ciment C2,
- la résistance en compression à 28 jours du béton de référence à base du ciment C1 est inférieure de 6 % par rapport à celle du béton de référence à base du ciment C2.

III. BESOIN EN EAU DES BETONS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

La substitution du ciment par des additions minérales, volume par volume en préservant un volume absolu des composants solides constant, engendre une variation de l'ouvrabilité du mélange frais caractérisée par l'affaissement des bétons frais au cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451.

La variation de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons à base des ciments C1 et C2, avec les additions Ca3, Pz2 et La, est représentée par la figure (IX.1).

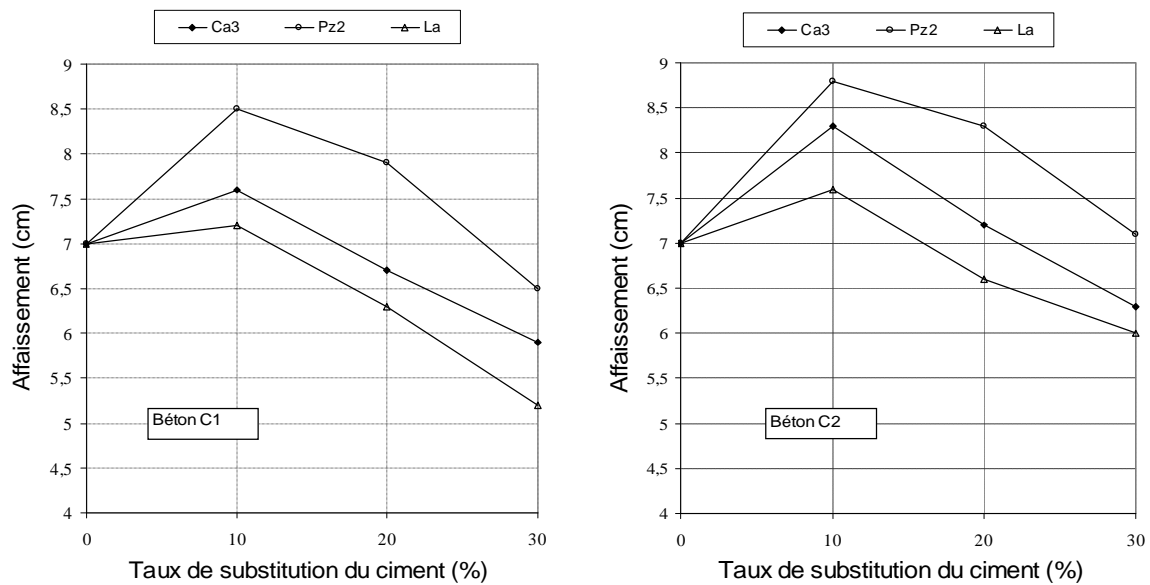


Figure IX.1 : Variation de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons C1 et C2, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Nous constatons sur la figure (IX.1), que le comportement des bétons C2 avec additions à l'état frais au cône d'Abrams est similaire à celui des bétons C1 avec additions. La consistance des bétons C1 et C2 avec additions, dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée dans le mélange.

Nous pouvons remarquer aussi, que l'affaissement du béton frais avec additions calcaires (Ca3), pouzzolanes (Pz2) et laitier (La), augmente jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange pour les deux ciments utilisés. Ceci suggère, que l'incorporation de ces additions dans les bétons C1 et C2 à faibles taux de substitution du ciment, améliore la plasticité des bétons, qui deviennent plus fermes à plus forts taux de substitution.

Le comportement des bétons avec additions calcaires (Ca3) et pouzzolanes (Pz2), est presque similaire à celui des mortiers avec ces mêmes additions, mais le comportement

des bétons avec additions de laitier (La) diffère à faibles taux de substitution du ciment de celui des mortiers avec additions de laitier. En effet la substitution du ciment par les additions de laitier dans les mortiers, engendre une réduction de l'ouvrabilité pour tous les taux de substitution du ciment, ce qui suggère que la présence de particules de graviers de formes angulaires améliore l'arrangement spatial des particules d'additions dans les bétons, à faibles taux de substitution pour ce type d'additions.

Pour donner aux bétons avec additions minérales la consistance de référence (affaissement au cône d'Abrams = 7 ± 0.5 cm), la quantité d'eau dans les mélanges a été ajustée. Ceci entraîne une variation du besoin en eau des bétons à même consistance définie dans les chapitres précédents par la variation du rapport volumique de la quantité d'eau par la quantité de liant (e/l) et évaluée en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %) (Figure IX.2).

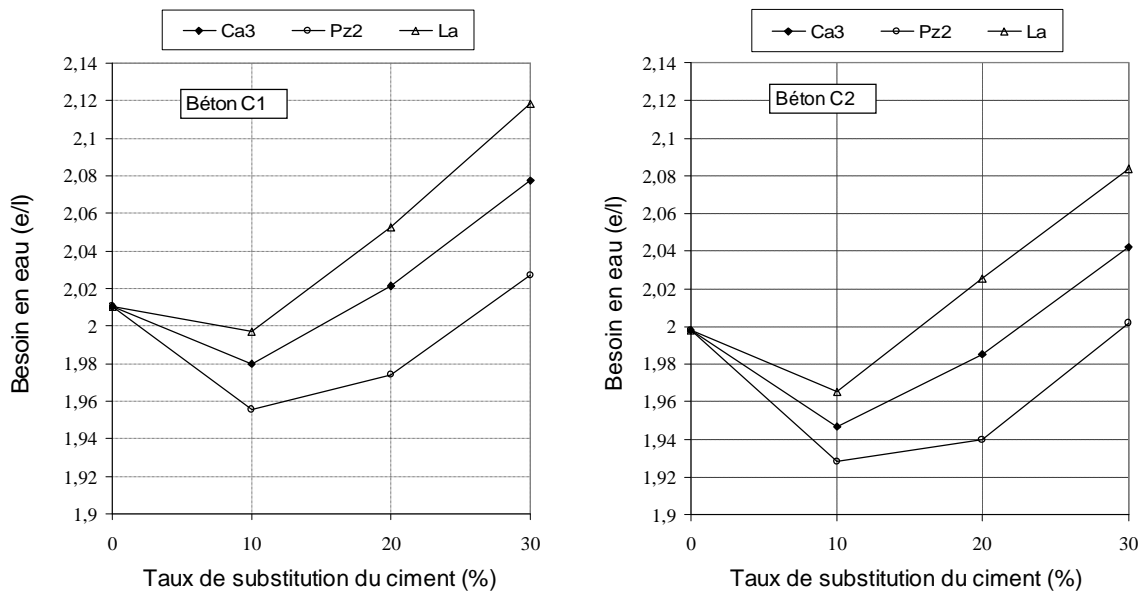


Figure IX.2 : Variation du besoin en eau des bétons C1 et C2 à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Nous pouvons constater que le besoin en eau des bétons C2 avec additions minérales varie de la même manière que celui des bétons C1 avec additions, et le classement relatif aux besoins en eau des bétons avec les différentes additions pour les deux ciments étudiés reste concordant. Ceci suggère que de même que pour les mortiers, le ciment modifie peu les propriétés rhéologiques des bétons avec additions à l'état frais. Nous pouvons aussi remarquer que le besoin en eau du béton de référence C1 est légèrement plus important que celui du béton de référence C2. Le besoin en eau des bétons avec

additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (morphologie) et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange.

Les bétons avec additions (Ca3, Pz2 et La), présentent un besoin en eau plus faibles que celui des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %, pour les deux ciments utilisés. Ce comportement indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les bétons avec ces additions minérales à faibles taux de substitution du ciment. Les particules de l'addition viennent dans ce cas remplir une partie de la porosité inter-granulaire du squelette solide et libérer l'eau remplissant habituellement ces pores. Ainsi la quantité d'eau nécessaire à la lubrification des particules pour donner au mélange la consistance de référence se trouve réduite. A plus forts taux de substitution du ciment par ces additions, le besoin en eau croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre. Pour les additions de pouzzolanes (Pz2), de finesse 5600 cm²/g, il reste pratiquement inférieur à celui du béton de référence, avec un léger dépassement à 30 % du taux de substitution du ciment, pour le béton C1. Pour les additions calcaires (Ca3), de finesse 8500 cm²/g et les additions de laitier granulé de hauts fourneaux de finesse 2900 cm²/g, le besoin en eau croit avec le taux de substitution du ciment, à partir de 10 % du taux de substitution du ciment indépendamment de la nature du ciment utilisé. Cette différence de comportement pour les bétons avec additions calcaires (Ca3) est probablement due à leur finesse qui se situe entre les additions fines et ultrafines. Le comportement des bétons avec additions de laitier (La), est probablement du à l'irrégularité et à l'aspect poreux de ses particules. Ce comportement a été relevé pour les mortiers et expliquées dans les chapitres précédents. Néanmoins une différence est signalée pour les additions (Ca3) et (La), à faibles taux de substitution, qui dans le cas des mortiers présentent un besoin en eau directement croissant avec l'augmentation du taux de substitution du ciment sans aucune réduction comme il a été enregistré pour les bétons. Ce comportement est probablement du à la présence des particules de gravier, dont la porosité inter-granulaire se trouve remplie par les additions à faible taux de substitution du ciment.

La similitude de comportement entre les bétons C1 et C2 avec additions est probablement due au fait que les deux bétons de référence présentent le même rapport volumique ciment/solide et la même consistance, c'est-à-dire que la structure du squelette granulaire et l'intensité des frictions entre les particules restent similaires.

Il en résulte donc que pour les faibles taux de substitution de ciment par les additions minérales utilisées, le besoin en eau des bétons avec additions est directement liée aux phénomènes de l'empilement granulaire, et donc à la compacité des mélanges à l'état frais, alors qu'à plus forts taux de substitution du ciment, les particules des additions deviennent plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide. Ce comportement est peu influencé par la nature du ciment.

IV. BESOIN EN ADJUVANT DES BETONS AVEC ADDITIONS A MEME CONSISTANCE

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré que l'action des additions étudiées pouvaient engendrer soit une diminution, soit une augmentation de la quantité d'eau dans le mélange pour assurer la consistance de référence. Ces effets favorables ou défavorables sur les propriétés rhéologiques des bétons frais, dépendaient, de la nature, de la quantité et des caractéristiques granulaires (finesse et morphologie) des additions dans les mélanges cimentaires.

Dans ce qui suit, nous avons utilisé dans les bétons de référence une quantité d'eau plus faible que celle nécessaire pour le gâchage des bétons avec additions, avec effet granulaire favorable sur les propriétés rhéologiques. De cette manière, nous avons maintenu dans toutes les formulations de bétons avec ou sans additions une quantité d'eau constante, ce qui a nécessité l'ajout d'une certaine quantité de superplastifiant nécessaire pour assurer la consistance de référence qui a été choisie égale à un affaissement de 7 ± 0.5 cm au cône d'Abrams. Le choix de la quantité d'eau dans les différentes formulations de béton a été fixé à 200 l/m^3 , pour assurer une certaine optimisation des quantités d'adjuvant lorsque le dosage en superplastifiant est maintenu autour de la plage d'efficacité la plus optimale.

Les résultats obtenus pour les bétons sans additions avec adjuvant superplastifiant SP1, sont résumés dans le tableau (IX.2).

Tableau IX.2 : Résultats des bétons C1 et C2 sans additions avec superplastifiant SP1.

Béton	Béton	Béton
	C1-SP1	C2-SP1
Affaissement (cm)	7	7
Besoin en eau (l/m^3)	200	200
Besoin en adjuvant (kg/m^3)	3.31	2.50
Résistance en compression R_{c7} (MPa)	13.30	12.42
Résistance en compression R_{c28} (MPa)	29.08	31.12

Nous remarquons que la quantité d'adjuvant superplastifiant SP1 dans les bétons sans additions correspondant à 0.95 % et 0.71 % du poids du ciment pour les ciments C1 et C2, respectivement, est située dans la plage d'efficacité de l'adjuvant (chapitre VI, § II).

Les résultats obtenus pour les deux bétons sans additions avec superplastifiant SP1 indiquent que :

- le besoin en adjuvant superplastifiant SP1 du béton C1 sans additions est supérieur de 32 % par rapport à celui du béton C2 à même consistance,
- la résistance en compression à 07 jours du béton C1-SP1 sans additions est supérieure de 7 % par rapport à celle du béton de référence C2-SP1,
- la résistance en compression à 28 jours du béton C1-SP1 sans additions est inférieure de 7 % par rapport à celle du béton de référence C2-SP1,

Comme les proportions des composants solides et la consistance des bétons avec adjuvant superplastifiant sont les mêmes que pour les deux bétons de référence sans adjuvant, il est légitime de penser que l'introduction d'une certaine quantité d'adjuvant dans le béton permet de réduire une certaine quantité d'eau égale à la différence des besoins en eau du béton sans adjuvant et du béton avec superplastifiant. La comparaison des bétons sans additions avec superplastifiant, avec les bétons de référence sans adjuvant, permet d'évaluer l'action de l'adjuvant superplastifiant en tant que réducteur d'eau.

La figure (IX.3) représente les dosages en superplastifiant SP1 introduits dans les bétons C1 et C2 sans additions, pour maintenir la consistance de référence à même quantité d'eau.

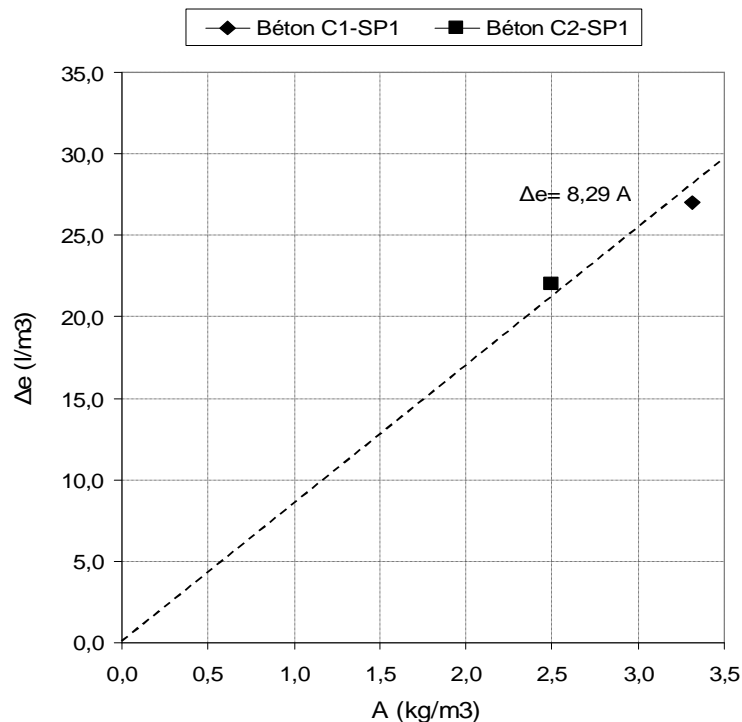


Figure IX.3 : Réduction du besoin en eau par l'adjuvant superplastifiant SP1, dans les bétons C1 et C2 sans additions à même quantité d'eau

Nous remarquons, que la réduction du besoin en eau engendré par l'introduction de l'adjuvant superplastifiant SP1 dans les bétons sans additions est de l'ordre de 27 l/m³ pour 3.31 kg/m³ d'adjuvant superplastifiant dans le cas du béton C1 et 22 l/m³ pour 2.5 kg/m³ d'adjuvant superplastifiant dans le cas du béton C2. D'autre part, nous constatons que les points expérimentaux des réductions du besoin en eau des bétons C1 et C2 sans additions se trouvent de part et d'autre de la droite d'équation " $\Delta e = 8.28.A$ ". Ceci montre que l'adjuvant superplastifiant SP1 est plus efficace dans les mortiers que dans les bétons et que la présence de particules de graviers plus grossiers et de formes angulaires dans les mélanges, réduit l'efficacité des superplastifiants, du probablement à l'augmentation des frictions entre ces particules. Le point expérimental du béton C2, se trouve au dessus de la droite d'efficacité moyenne, alors que celui du béton C1 se trouve en dessous, ce qui confirme la meilleure efficacité du superplastifiant SP1 avec le ciment C2. Cette même conclusion a été relevée et analysé pour les mortiers, où nous avons avancé que l'efficacité du superplastifiant dépendait de la nature du ciment. Ceci a été expliqué par l'influence de la teneur du ciment en C_3A , car le ciment riche en C_3A , comme dans le cas du Ciment C1, réduit l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant.

La quantité d'adjuvant (A en kg/m³), nécessaire pour conférer aux bétons C1 et C2 avec additions, la consistance de référence est représentée par la figure (IX.4), en fonction du taux de substitution du ciment par les diverses additions étudiées.

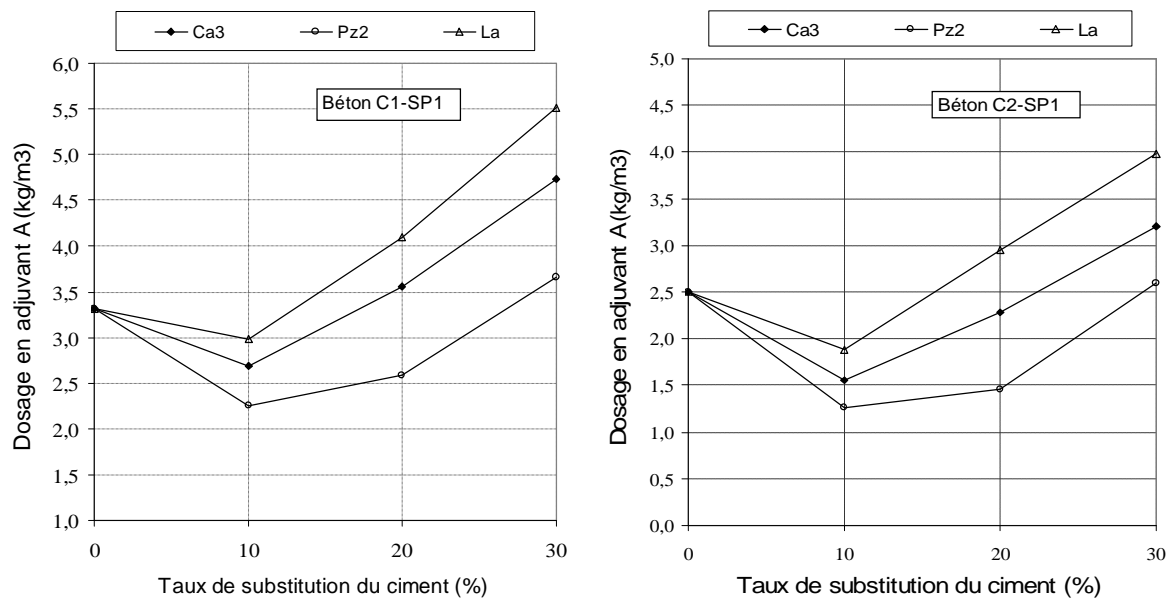


Figure IX.4 : Variation du dosage en adjuvant des bétons C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment

Nous pouvons constater sur la figure (IX.4), que le dosage en adjuvant SP1 est plus important pour le béton C1 sans additions que pour le béton C2. Néanmoins, nous pouvons remarquer que le ciment modifie peu les comportements rhéologiques des bétons avec additions à l'état frais et les dosages en adjuvant superplastifiant SP1 des bétons C2 avec additions varient de la même manière que ceux des bétons C1 avec additions. Ainsi, le classement relatif aux dosages en adjuvant SP1 des bétons avec les différentes additions étudiées se trouve maintenu.

Le besoin en adjuvant peut être également exprimé en taux massique par rapport à la quantité de liant (A/L en %), et est représenté pour les bétons C1 et C2 avec additions, en fonction du taux de substitution du ciment, par la figure (IX.5).

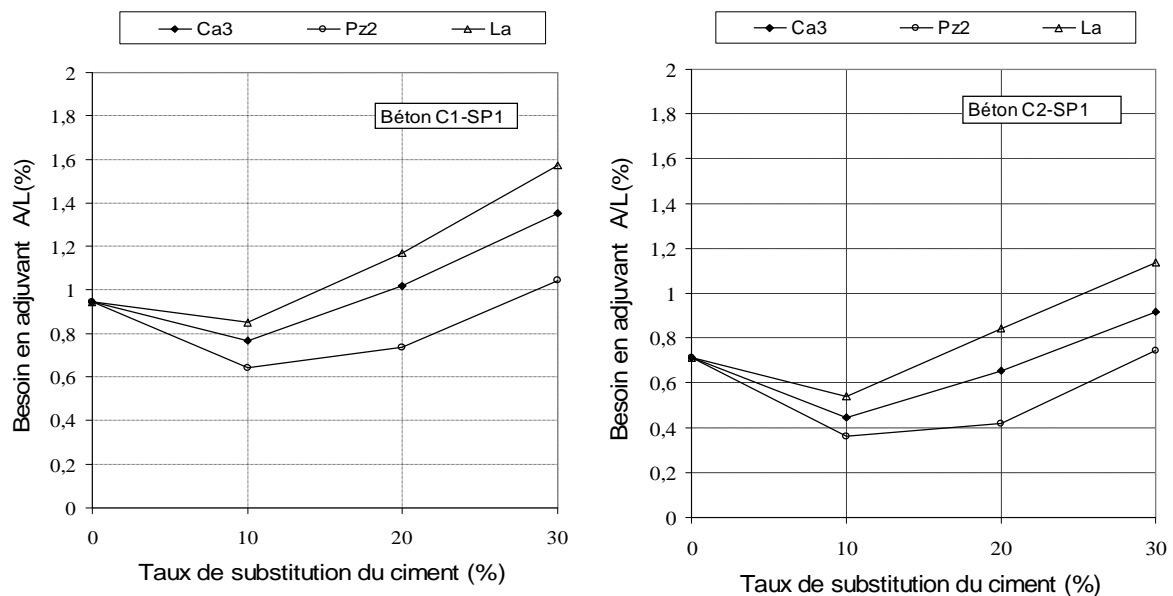


Figure IX.5 : Variation du besoin en adjuvant des bétons C1 et C2 avec additions à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment

Nous remarquons sur la figure (VI.4), que le besoin en adjuvant des bétons avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse et morphologie) et la quantité d'addition incorporée dans le mélange. La variation du besoin en adjuvant suit globalement la variation du besoin en eau des bétons avec additions sans adjuvants superplastifiants, pour les deux ciments utilisés (fig. IX.2).

Les bétons avec additions (Ca3, Pz2 et La), présentent des besoins en adjuvants plus faibles que ceux des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %, pour les deux ciments utilisés. Comme il a été remarqué pour les besoins en eau, ce comportement confirme l'optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les bétons avec ces additions minérales à faibles taux de substitution du ciment. A plus forts

taux de substitution du ciment par ces additions, le besoin en adjuvant croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre. Le besoin en adjuvant est plus important pour les bétons avec additions de laitier (La), puis pour les bétons avec additions calcaires (Ca3), puis pour les bétons avec additions de pouzzolanes (Pz2). Ceci est probablement dû à l'irrégularité et à l'aspect poreux des particules de laitier, malgré leur petite finesse et à la grande finesse des additions calcaires dont le comportement se rapproche de celui des additions ultrafines.

Ce comportement a été relevé pour les mortiers et expliquées dans le chapitre VI. Néanmoins les bétons avec additions (Ca3) et (La), à faibles taux de substitution, présentent un comportement différent des mortiers qui affichent un besoin en adjuvant croissant avec l'augmentation du taux de substitution du ciment sans aucune réduction, comme il a été enregistré pour les bétons.

Il en résulte donc que la diminution du besoin en adjuvant des bétons avec additions fines à faibles taux de substitutions du ciment par rapport au béton de référence confirme une optimisation de l'arrangement spatial des particules dans le mélange. Cette optimisation de l'arrangement spatial des particules d'additions tend à disparaître à plus forts taux de substitution du ciment aux dépens des frictions inter-granulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide, qui sont plus visibles pour les additions de laitier (La), et les additions calcaires (Ca3).

V. RESISTANCES EN COMPRESSION DES BETONS AVEC ADDITIONS ET SUPERPLASTIFIANTS

Les variations des résistances en compression à 07 jours et 28 jours des bétons C1 et C2 avec superplastifiant SP1 sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (IX.6) et (IX.7).

Nous remarquons que le béton C2-SP1 sans additions présente une résistance en compression à 07 jours plus faible que celle du béton C1-SP1 sans additions, de 7 % ; par contre, sa résistance en compression à 28 jours lui est supérieure de 7 %. Nous pouvons remarquer aussi, que les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des bétons avec additions minérales et superplastifiant SP1 varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse et morphologie) et la quantité d'addition incorporée.

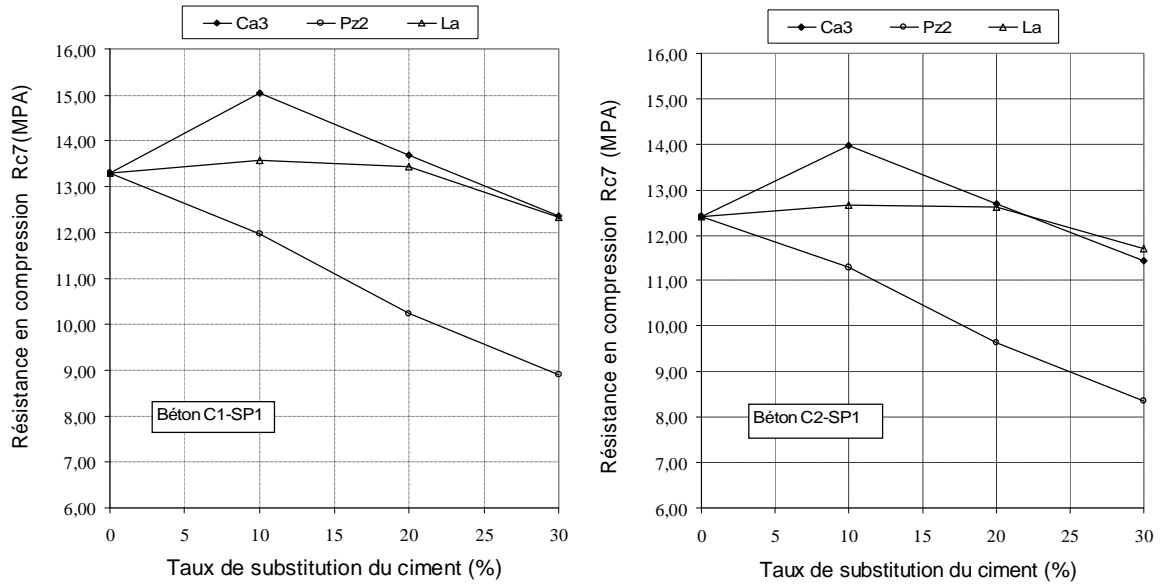


Figure IX.6 : Variation de la résistance en compression à 7 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

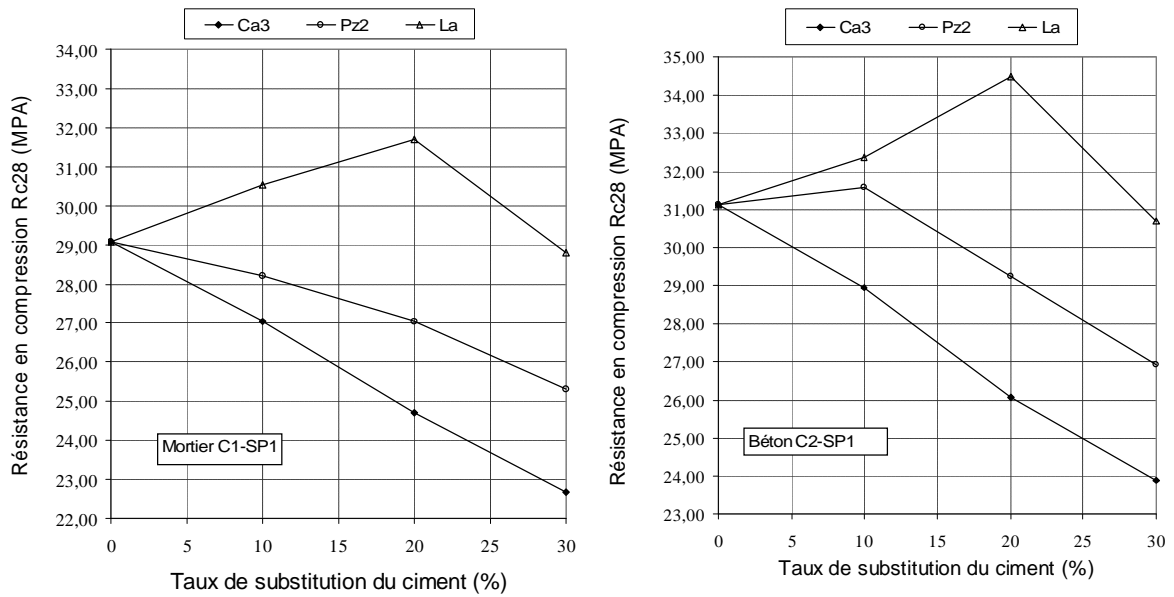


Figure IX.7 : Variation de la résistance en compression à 28 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

La variation de la résistance relative à 07 jours et 28 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1 avec additions, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les figures (IX.8) et (IX.9).

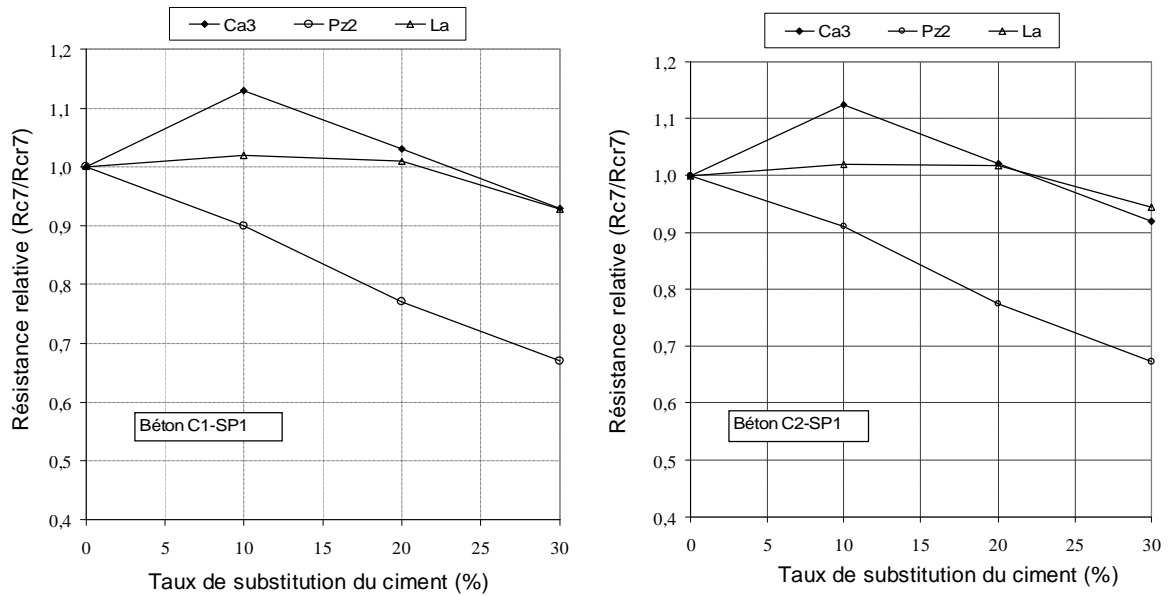


Figure IX.8 : Variation de la résistance relative à 07 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

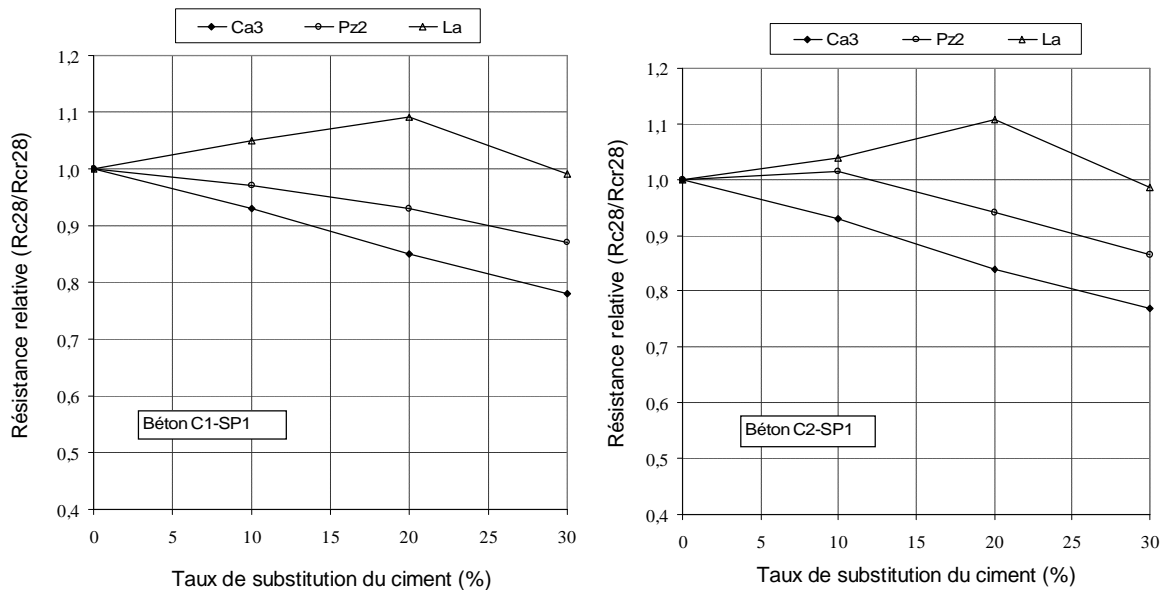


Figure IX.9 : Variation de la résistance relative à 28 jours des bétons C1-SP1 et C2-SP1, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

Nous remarquons que les résistances en compression à 07 jours des bétons C1-SP1 avec additions calcaires (Ca3), croissent pour les faibles taux de substitution du ciment et atteignent une amélioration de 13 % au voisinage de 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les additions laitier granulé de hauts fourneaux (La), les résistances en compression à 07 jours se maintiennent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment puis

commencent à décroître. Pour les additions de pouzzolanes (Pz2), les résistances en compression à 07 jours diminuent directement sans aucune inflexion favorable.

A 28 jours, les résistances en compression des bétons C1-SP1 avec additions calcaires (Ca3) et pouzzolanes (Pz2), diminuent directement sans aucune amélioration. Cette décroissance étant plus accentuées pour les bétons avec additions (Ca3). Les résistances en compression des bétons C1-SP1 avec additions de laitier (La), croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment où elles affichent une amélioration maximale de 09 % par rapport au mortier C1-SP1 sans additions, puis commencent à décroître.

Le comportement des bétons C2-SP1 avec additions calcaires (Ca3) et de laitier (La) à 07 jours et 28 jours, est pratiquement similaire à celui des bétons C1-SP1. A 28 jours, les bétons C2-SP1 avec additions de pouzzolanes (Pz2), présentent un meilleur comportement que dans le cas des bétons C1-SP1. Dans ce cas, la résistance en compression à 28 jours, affiche une amélioration relative de 2 % à 10 % du taux de substitution du ciment.

Le comportement des bétons avec additions et superplastifiants aux résistances en compression est similaire à celui des mortiers, et les phénomènes à l'origine des modifications des résistances en compression à 07 jours et 28 jours ont été expliqués et analysés dans le chapitre (VII) et sont donc confirmés pour les bétons.

Nous pouvons donc déduire que de même que pour les mortiers avec additions et superplastifiants, l'action des additions calcaires sur le ciment est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges, à faible taux de substitution du ciment par l'addition. Cette accélération est peu influencée par la nature du ciment.

Les bétons avec additions de pouzzolanes présentent un meilleur comportement avec le ciment C2, en raison de l'utilisation probable de la pouzzolane comme ajout dans le ciment composé C1. Les résistances en compression se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 07 jours d'âge, à cause probablement d'un effet pouzzolanique qui se déclare plus tardivement.

La présence des additions de laitier granulé des hauts fourneaux dans les bétons à faibles taux de substitution du ciment (<20 %) maintient la résistance en compression à 07 jours jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment et procure un gain de résistance intéressant à 28 jours. Le gain de résistance dans les bétons avec additions de laitier est probablement du aux propriétés hydrauliques latentes du laitier vitrifié moulu, classé comme additions du type II, par les adaptations en France de la norme européenne EN 206-1.

VI. APPORT DES ADDITIONS ET DES SUPERPLASTIFIANTS POUR LES RESISTANCES EN COMPRESSION DES BETONS

L'apport des additions et des superplastifiants aux résistances en compression à 07 jours et 28 jours, peut être évalué en analysant la variation des résistances en compression

des bétons avec additions et superplastifiant SP1 (Béton C-SP+add), par rapport aux bétons de référence sans superplastifiants (Béton Ref. C), en fonction du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés.

D'une manière générale, les figures (IX.10) et (IX.11), confirment l'apport positif de l'action combinée des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours, à faibles taux de substitution du ciment, ainsi que le meilleur comportement des additions avec le ciment C2. Cet apport dépend de la nature et de la quantité d'additions dans le mélange, ainsi que de la nature du ciment utilisé.

VI.1. RESISTANCES EN COMPRESSION A 07 JOURS

L'apport des additions et du superplastifiant SP1 aux résistances en compression à 07 jours, peut être représenté en fonction du taux de substitution du ciment, par la figure (IX.10) pour les bétons C1 et C2. Nous pouvons remarquer que l'apport du superplastifiant SP1 aux résistances en compression à 07 jours pour les bétons C1 et C2 sans additions, peut atteindre 10 % d'amélioration.

Pour les bétons avec additions calcaires (Ca3), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 24 % pour les ciments C1 et C2. L'apport des additions de pouzzolanes (Pz2), aux résistances en compression à 07 jours est défavorable, mais l'ajout du superplastifiant SP1 permet de maintenir ces résistances jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés. En effet, le gain relatif de résistance en compression à 07 jours est maximal pour les bétons sans additions avec le superplastifiant SP1.

Pour les bétons avec additions de laitier (La), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 12 % pour les ciments C1 et C2 avec le superplastifiant SP1.

Nous pouvons donc confirmer que l'action combinée des additions minérales et des superplastifiants sur les résistances en compression à 07 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment par les additions et le comportement des additions est meilleur avec le ciment C2. Les additions calcaires apportent le meilleur gain des résistances en compression à 07 jours des bétons en présence d'adjuvants superplastifiants. L'apport positif des additions calcaires est essentiellement dû à l'accélération du processus d'hydratation du ciment par les additions calcaires à jeunes âges, ainsi qu'à la réduction de la quantité d'eau nécessaire à la consistance de référence par l'utilisation des adjuvants superplastifiants.

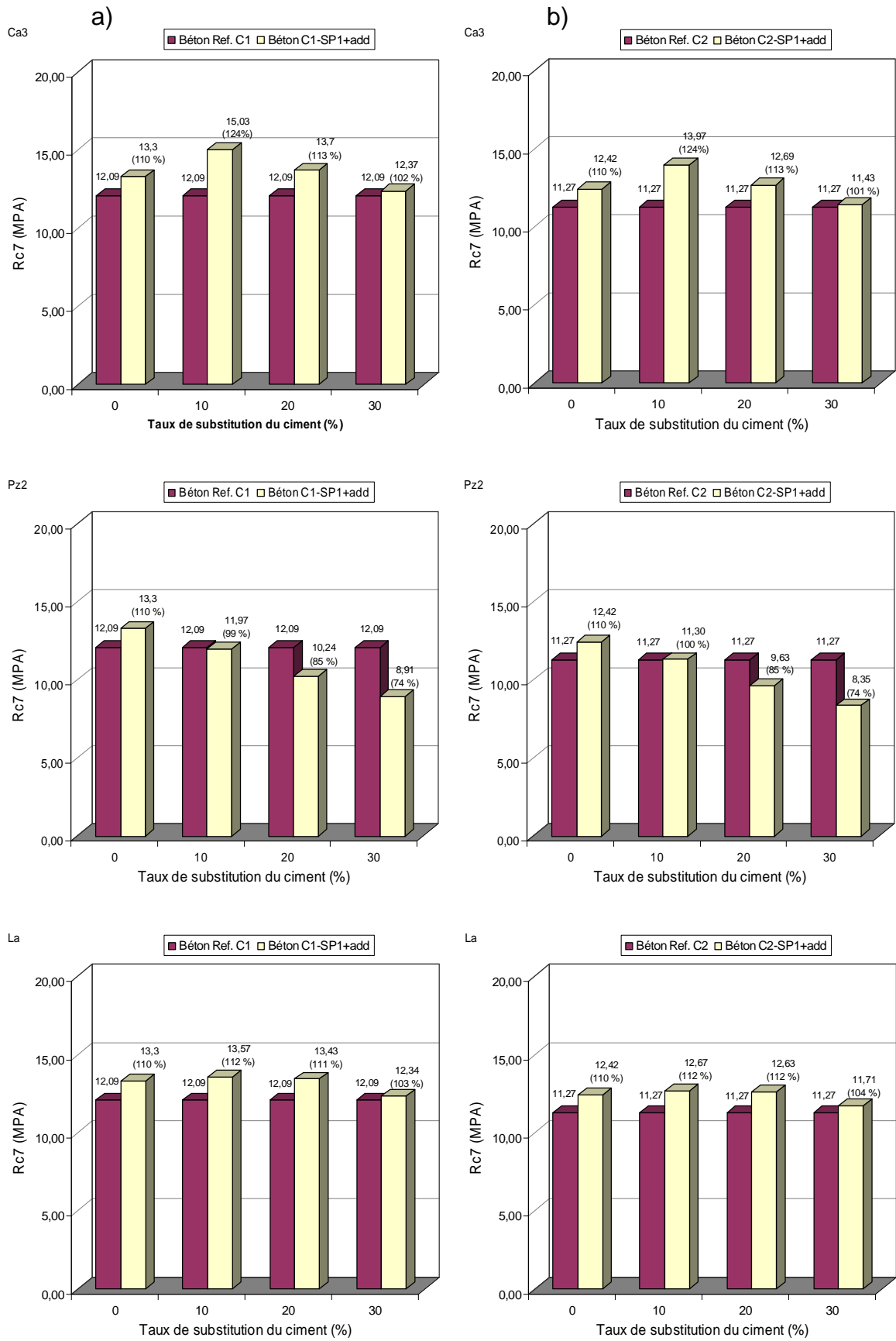


Figure IX.10: Apport des additions (Ca3, Pz2 et La) et du superplastifiants SP1 aux résistances en compression à 07 jours des bétons C1 (a) et C2 (b)

VI.2. RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS

L'apport des additions et du superplastifiant SP1 aux résistances en compression à 28 jours, peut être représenté en fonction du taux de substitution du ciment, par la figure (IX.11) pour les bétons C1 et C2. Nous pouvons remarquer que l'apport du superplastifiant SP1 aux résistances en compression à 28 jours dans les bétons C1 et C2 sans additions, peut atteindre 11 % et 12 %, pour les ciments C1 et C2, respectivement.

L'apport des additions calcaires (Ca3), aux résistances en compression à 28 jours est défavorable, mais l'ajout du superplastifiant SP1 permet d'obtenir des résistances supérieures à celle du béton sans additions, jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments. En effet, le gain relatif de résistance en compression à 28 jours est maximal pour les bétons sans additions avec le superplastifiant SP1.

Pour les bétons avec additions de pouzzolanes (Pz2), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés. Le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 08 % et 13 % pour les ciments C1 et C2, respectivement.

Pour les bétons avec additions de laitier (La), l'apport aux résistances en compression à 28 jours est maximal à 20 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 21 % et 24 % pour les deux ciments C1 et C2, respectivement.

Nous pouvons donc confirmer que l'action combinée des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur les résistances en compression à 28 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment par les additions et le comportement des additions est meilleur avec le ciment C2. Cet apport aux résistances en compression à 28 jours est du en premier lieu à la réduction de la quantité d'eau dans les mélanges à même consistance, par l'utilisation du superplastifiants SP1. L'utilisation du superplastifiant peut aussi participer à l'amélioration du processus d'hydratation du ciment comme l'ont confirmé plusieurs études. Ces phénomènes combinés ont pu engendrer un gain de résistance intéressant à l'image des bétons sans additions pour lequel l'amélioration des résistances peut atteindre 12 %, pour le béton de C1 sans additions avec le superplastifiant SP1. En second lieu, cet apport aux résistances en compression à 28 jours est du à l'activité chimique de l'addition même, qui dans le cas des additions classés du type II selon les adaptations en France de la norme européenne EN 206-1, apportent un complément significatif au gain de résistance, qui peut atteindre en cumul jusqu'à 24 % pour les additions de laitier dans les bétons C2 avec superplastifiant SP1 à 20 % du taux de substitution du ciment. L'apport positif des additions de laitier est essentiellement du à ses propriétés hydrauliques latentes.

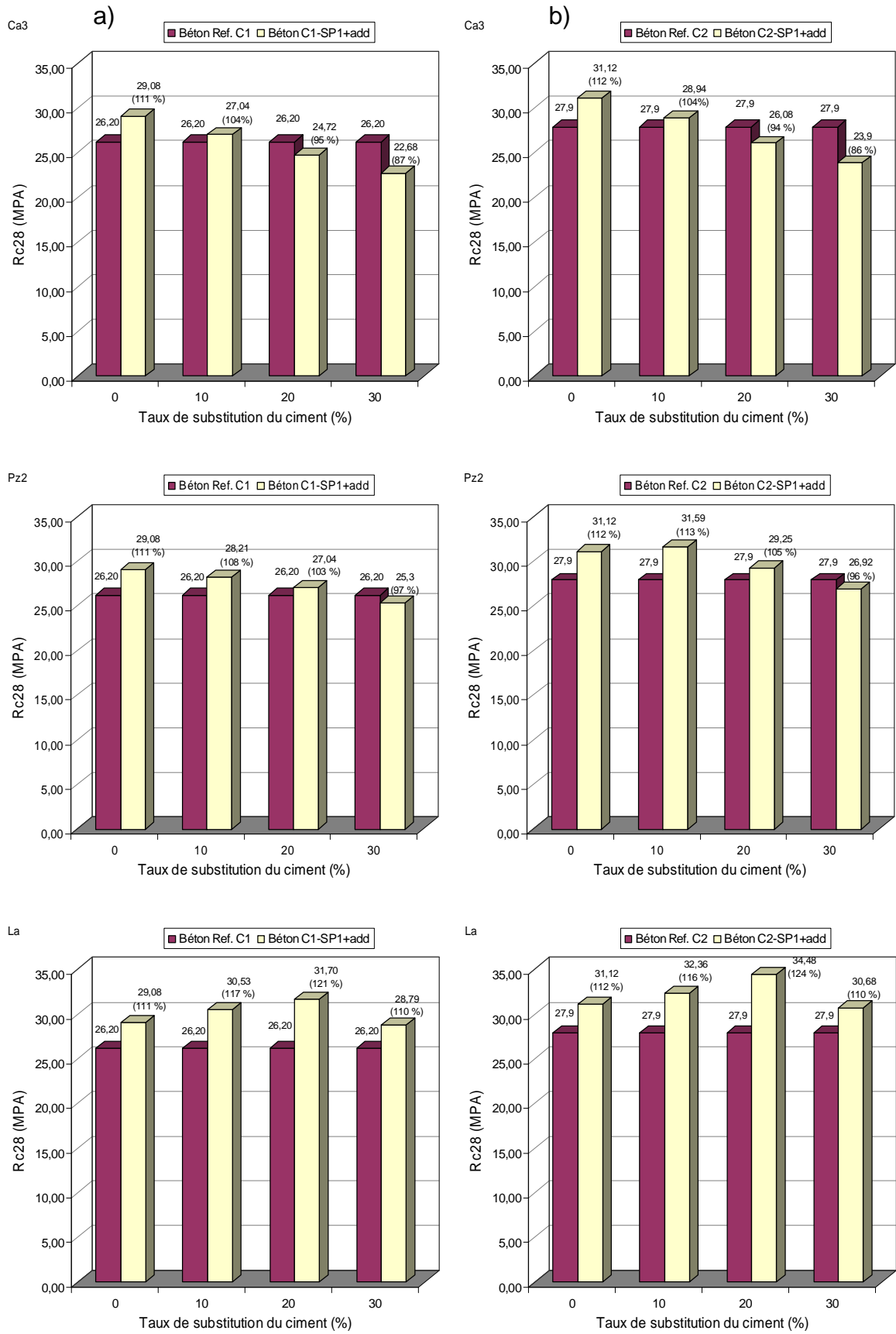


Figure IX.11: Apport des additions (Ca3, Pz2 et La) et du superplastifiants SP1 aux résistances en compression à 28 jours des bétons C1 (a) et C2 (b)

Il en résulte donc que les résultats obtenus pour les bétons avec additions et superplastifiant, rejoignent globalement les résultats avancés pour les mortiers. Les phénomènes à l'origine des améliorations des résistances mécaniques à 07 jours et 28 jours ont été développés et analysés dans les chapitres précédents et peuvent être reconduits pour les bétons.

VII. SYNTHÈSE

Le principal objectif de ce chapitre était de valider les conclusions émises pour les mortiers avec additions et superplastifiants pour les bétons. Dans ce but, la même méthodologie expérimentale appliquées aux mortiers a été reconduite et l'application des additions minérales dans les bétons a été limitée aux additions calcaires (Ca3), les additions de pouzzolanes (Pz2) et les additions de laitier (La), avec les ciments C1 et C2 et le superplastifiant SP1.

Les bétons de référence sans additions et sans superplastifiants ont été confectionnés en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse, en limitant le diamètre du plus gros granulat à 25 mm, l'affaissement au cône d'Abrams à 7 ± 0.5 cm et la résistance caractéristique exigée à 25 MPa.

Le comportement des bétons C2 avec additions à l'état frais au cône d'Abrams est similaire à celui des bétons C1 avec additions. La consistance des bétons C1 et C2 avec additions, dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée dans le mélange. Le comportement des bétons avec additions calcaires (Ca3) et pouzzolanes (Pz2), est presque similaire à celui des mortiers avec ces mêmes additions, mais le comportement des bétons avec additions de laitier (La) diffère à faibles taux de substitution du ciment de celui des mortiers avec la même addition.

Le ciment modifie peu les propriétés rhéologiques des bétons avec additions à l'état frais, mais le besoin en eau des bétons avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange. Les bétons avec additions (Ca3, Pz2 et La), présentent un besoin en eau plus faibles que celui des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %, pour les deux ciments utilisés. Ce comportement indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les bétons avec ces additions minérales à faibles taux de substitution du ciment. A plus forts taux de substitution du ciment par ces additions, le besoin en eau croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre.

Dans l'étude des bétons avec additions et superplastifiants, nous avons maintenu dans toutes les formulations de bétons avec ou sans additions une quantité d'eau constante,

ce qui a nécessité l'ajout d'une certaine quantité d'adjuvant nécessaire pour assurer la consistance de référence

La comparaison des bétons sans additions avec superplastifiant, avec les bétons de référence sans adjuvant, a permis de confirmer pour les bétons que le superplastifiant SP1 est plus efficace dans les bétons C2 que dans les bétons à base de ciment C1, riche en C_3A . Il a été aussi montré que le superplastifiant SP1 était plus efficace dans les mortiers que dans les bétons, car l'importance des frictions entre les particules de graviers plus grossiers et de formes angulaires dans les mélanges, réduisait l'efficacité des superplastifiants.

D'une manière générale, la variation du besoin en adjuvant suit globalement les mêmes comportements que la variation du besoin en eau des bétons avec additions sans adjuvants superplastifiants, pour les deux ciments utilisés.

Les résistances en compression à 07 jours et 28 jours des bétons avec additions minérales et superplastifiant SP1 varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse et morphologie) et la quantité d'addition incorporée.

Les résistances en compression à 07 jours des bétons C1-SP1 avec additions (Ca3), croissent pour les faibles taux de substitution du ciment et atteignent une amélioration de 13 % au voisinage de 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition. Pour les additions (La), elles se maintiennent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment puis commencent à décroître. Pour les additions (Pz2), elles diminuent directement sans aucune amélioration.

A 28 jours, les résistances en compression des bétons C1-SP1 avec additions (Ca3) et (Pz2), diminuent sans aucune amélioration. Pour les additions (La), elles croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment où elles affichent une amélioration maximale de 09 % par rapport au mortier C1-SP1 sans additions, puis commencent à décroître.

Le comportement des résistances en compression des bétons C2-SP1 avec additions est pratiquement similaire à celui des bétons C1-SP1 à l'exception des additions (Pz2) qui affichent à 28 jours, une amélioration relative de 2 % à 10 % du taux de substitution du ciment dans le cas du ciment C2.

Le comportement des bétons avec additions et superplastifiants aux résistances en compression est similaire à celui des mortiers, et les analyses qui justifient ces modifications ont été développées dans les chapitres précédents.

L'apport des additions étudiées et du superplastifiant SP1 aux résistances en compression à 07 jours et 28 jours pour les bétons C1 et C2, dépend de la nature et de la quantité d'additions dans le mélange, ainsi que de la nature du ciment utilisé. L'action combinée des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment par les additions et le comportement des additions est meilleur avec le ciment C2.

Les additions (Ca3) apportent le meilleur gain des résistances en compression à 07 jours, qui peut atteindre une amélioration de 24 % à 10 % du taux de substitution du ciment. L'apport positif des additions calcaires est essentiellement dû à l'accélération du processus d'hydratation du ciment par les additions calcaires à jeunes âges, ainsi qu'à la réduction de la quantité d'eau nécessaire à la consistance de référence par l'utilisation des superplastifiants. L'apport des additions (Pz2), aux résistances en compression à 07 jours est défavorable, mais l'ajout du superplastifiant SP1 permet de maintenir ces résistances jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments. Pour les bétons avec additions (La), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 %, pour les deux ciments utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 12 % pour les ciments C1 et C2 avec le superplastifiant SP1.

L'apport des additions (Ca3), aux résistances en compression à 28 jours est défavorable, mais l'ajout du superplastifiant SP1 permet d'obtenir des résistances supérieures à celle du béton sans additions, jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, pour les deux ciments. Pour les bétons avec additions (Pz2), l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 20 %, pour les deux ciments. Le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 08 % et 13 % pour les ciments C1 et C2, respectivement. Pour les bétons avec additions (La), l'apport aux résistances en compression à 28 jours est maximal à 20 % du taux de substitution du ciment par les additions et reste favorable jusqu'à 30 %, pour les deux ciments utilisés. Dans ce cas, le gain relatif maximal de résistance en compression peut atteindre 21 % et 24 % pour les deux ciments C1 et C2, respectivement.

L'apport aux résistances en compression à 28 jours a été expliqué dans les chapitres précédents. Cet apport est dû en premier lieu à la réduction de la quantité d'eau dans les mélanges à même consistance, par l'utilisation du superplastifiant SP1. En second lieu, il est dû à l'activité chimique de l'addition même, qui dans le cas des additions classés du type II selon les adaptations en France de la norme européenne EN 206-1, apportent un complément significatif au gain de résistance.

Il en résulte donc que les résultats obtenus pour les bétons avec additions et superplastifiant, rejoignent globalement les résultats avancés pour les mortiers. Les phénomènes à l'origine des améliorations des résistances mécaniques à 07 jours et 28 jours ont été développés et analysés dans les chapitres précédents et peuvent être reconduits pour les bétons.

CONCLUSION GENERALE

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire : Un effet granulaire un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique propre à certaines additions.

Pour bien évaluer l'effet des additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état durci, il nous a paru indispensable de maîtriser l'effet granulaire engendré par ces additions afin de tenir compte de la capacité d'empilement des particules de l'addition avec les autres composants solides du squelette granulaire et de l'intensité des frictions de ces particules en présence d'eau. En général, l'augmentation du besoin en eau ou la diminution de la fluidité engendrés par l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires est maîtrisée par l'utilisation des adjuvants fluidifiants. Certains adjuvants superplastifiants, par delà leur effet physique modifiant les forces inter-particulaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline. Ces actions dépendent de la nature du ciment, de la nature, de la quantité et de la finesse de l'addition, ainsi que de la nature du superplastifiant.

Nous nous sommes donc proposé dans cette étude de déterminer le rôle des additions minérales et des adjuvants fluidifiants sur la structure et les propriétés des matériaux cimentaires dans le but d'apporter des éléments scientifiques pour la définition d'une méthodologie de formulation avec additions minérales et adjuvants fluidifiants afin de permettre une optimisation de leur utilisation et l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons.

Afin de répondre aux objectifs visés par cette thèse, et évaluer d'une manière plus précise les effets que peuvent engendrer les additions minérales sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci, nous avons proposé d'utiliser une méthodologie spécifique qui est basée sur la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mortiers dont le volume absolu de l'ensemble des constituants solides et la consistance des mélanges sont préservés constants. Dans la première phase de l'étude l'ouvrabilité des mélanges a été conservée constante par la correction de la quantité d'eau dans le mélange sans l'utilisation des adjuvants fluidifiants. Ceci a permis de mettre en évidence l'effet granulaire des additions minérales sur le besoin en eau, la densité de l'arrangement spatial des particules à propriétés rhéologiques constantes, ce qui garantit une

lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire et assure la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire. En second lieu, la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires a été maintenue constante pour toutes les formulations afin de permettre le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais, en supposant que le volume d'air occlus dans les mélanges ne varie pas significativement. Dans ce cas, l'ouvrabilité des mélanges a été conservée par l'introduction d'adjuvants superplastifiants.

L'utilisation des additions minérales dans le béton a aussi pour objectif de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou co-produits industriels disponibles en Algérie. De ce fait, les additions minérales choisies pour cette étude sont courantes en Algérie, de faible coût, et sont déjà utilisées comme ajouts au ciment composé CEM II dans les différentes cimenteries du pays. Les effets granulaires et chimiques ont été analysés par rapport à une addition de fumée de silice importée de France. Nous avons aussi utilisé deux types de ciments courants en Algérie pour pouvoir analyser l'effet de la nature du ciment sur le comportement des additions minérales dans les mélanges cimentaires ; il s'agit du ciment portland composé C1 : CPJ-CEM II/A 42.5 utilisé pour la confection des bétons courants et le ciment portland artificiel C2 : CPA-CEM I/A 42.5 utilisé pour la confection des bétons résistants aux sulfates (Ciment CRS). La maîtrise de l'effet granulaire des additions a été réalisée par l'introduction de deux (02) adjuvants superplastifiants hauts réducteur d'eau, conformes à la norme EN 934-2, pour juger l'influence de la nature de l'adjuvant superplastifiant sur les propriétés des matériaux cimentaires et son interaction avec les différents composants du mélange (ciment et additions).

Les principaux résultats obtenus dans cette étude peuvent se résumer comme suit :

Ø Pour les mortiers avec additions à l'état frais:

- n** Le comportement rhéologique dépend de la nature, la quantité et la finesse des additions, indépendamment de la nature du ciment utilisé.
- n** Les dosages de saturation sont atteints plus vite pour les mortiers C2 à faible teneur en C_3A , pour les deux superplastifiants utilisés.
- n** L'efficacité du superplastifiant dépend de la nature du ciment et elle est plus forte dans les mortiers à base de ciment C2 à faible teneur en C_3A .
- n** La présence des additions minérales dans les mortiers réduit l'efficacité des adjuvants superplastifiants.

Ø Pour les mortiers avec additions à l'état durci:

- n L'action combinée des additions et des superplastifiants sur les résistances en compression à 28 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment.
- n Le comportement des additions est meilleur avec le ciment C2.
- n Le comportement des additions est meilleur avec le superplastifiant SP1.
- n L'apport des additions aux résistances est du à:
 - la maîtrise de l'effet granulaire défavorable pour certaines additions, par l'utilisation des super plastifiants qui peuvent aussi participer à l'amélioration du processus d'hydratation.
 - l'activité chimique de l'addition, qui dans le cas des additions du type II selon la norme européenne EN 206-1, apporte un complément significatif au gain de résistance.

Ø Pour les facteurs d'activité chimiques:

- n Les facteurs d'activité des additions (Ca1, Ca2, Ca3, Pz1, Pz2 et La) sont plus forts dans les mélanges avec superplastifiants que dans les mortiers sans superplastifiants. Leurs valeurs sont justifiées par rapport à la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France.
- n Pour la fumée de silice, l'activité chimique se déclare mieux dans les mélanges cimentaires sans superplastifiants. Néanmoins, le modèle de Féret, engendre un coefficient k dans les mortiers C1 (Ciment composé CEM II/A 42.5), inférieures à la valeur préconisée par la norme européenne.
- n Les facteurs d'activité des additions sont généralement plus importants avec le superplastifiant SP1 et le ciment C2.
- n Les facteurs d'activité calculés à partir du modèle de Bolomey KB sont toujours plus forts que ceux calculés à partir du modèle de Féret KF, de meilleure précision.
- n Les facteurs d'activité des additions étudiées sont beaucoup influencés par la finesse des particules. Cette influence dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée, indépendamment de la nature du ciment utilisé.

Ø Pour les bétons courants:

- L'étude a été limitée aux additions calcaires (Ca3), les additions de pouzzolanes (Pz2) et les additions de laitier (La), avec les ciments C1 et C2 et le superplastifiant SP1.
- n L'utilisation des additions à faibles taux avec le superplastifiant SP1 apporte des améliorations significatives aux propriétés mécaniques.
 - n Pour les additions de laitier, classées en type II selon les adaptations en France de la norme européenne, ces améliorations sont significatives à 20 % du taux de

- substitution. Une finesse équivalente à celle du ciment, permet de garantir ces améliorations.
- n Pour les additions de pouzzolane classées en type I selon les adaptations en France de la norme européenne, les améliorations de résistances peuvent être aussi intéressante à 10 % du taux de substitution. Une finesse supérieure à celle du ciment ($\sim 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$), est nécessaire pour garantir ces améliorations.
 - n Pour les additions calcaires, classées en type I selon les adaptations en France de la norme européenne, les améliorations de résistances à 28 jours, restent assez limitées à 10 % du taux de substitution. Une finesse assez importante ($\sim 8000 \text{ cm}^2/\text{g}$), est nécessaire pour garantir un minimum d'amélioration. A 07 jours les améliorations sont beaucoup plus intéressantes.
 - n Les valeurs des facteurs d'activités chimiques à 07 jours et 28 jours, des différentes additions étudiées sont très variables et dépendent, de la nature du ciment utilisé, du modèle de résistance adopté, de la nature minéralogique et chimique, de la quantité et des caractéristiques granulaires de l'addition incorporée.
 - n La prise en considération de l'activité chimique de ces additions dans les modèles prédictifs de résistance (Féret, Bolomey,...), sur la base des facteurs d'activité définis par la norme européenne EN 206-1 et ses adaptations en France est bien justifiée pour les additions calcaires ($k=0.25$) et les additions de laitier ($k=0.9$). Néanmoins la valeur de k pour les additions de pouzzolanes est toujours supérieure à 0.5 dans tous les cas.
 - n Pour les fumées de silice, une attention particulière est à prendre en compte dans le cas d'une utilisation avec le ciment C1 (CEM II/A 42.5), car les valeur du facteur k sont toujours inférieurs à la valeur préconisée par la norme européenne EN 206-1 ($k = 2.0$), dans le cas du modèle de résistance de Féret de meilleure précision.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux effectués dans cette thèse ont considéré plusieurs paramètres qui influent sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons.

Ce domaine peut être approfondi et enrichi en procédant à:

- Ø des examens microstructuraux par microscopie électronique à balayage,
- Ø l'identification des phases cristallines par diffractométrie des rayons X.
- Ø aux mesures porométriques et de perméabilité.
- Ø à l'étude de la contribution des additions à la résistance chimique des bétons.
- Ø à une analyse de l'effet des superplastifiants de diverses natures sur la plasticité des mélanges cimentaires frais avec additions (Rhéomètres).

D'autre part, et à la suite des résultats obtenus, une attention particulière sera donnée à:

- Ø la valorisation des pouzzolanes et surtout du laitier granulé de hauts fourneaux pour l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons à moyens et longs termes.
- Ø l'application des additions calcaires pour l'amélioration des résistances à jeunes âges et leur utilisation dans les bétons préfabriqués.

REFERENCES

- [1] : **Baron J., Ollivier J. P.**, Les bétons, bases et données pour leur formulation, Editions Eyrolles, 1997.
- [2] : **Cyr M.**, Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologiques des matrices cimentaires, Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 1999.
- [3] : **Lawrence P.**, Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000.
- [4] : **Lawrence P., Cyr M., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars, Effect of inert materials on short-term hydration, Cement and concrete research Vol. 33, p. 1939-1947, 2003.
- [5] : **Cyr M., Lawrence P., Ringot E.**, Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, Cement and concrete research Vol. 36, p. 264-277, 2006.
- [6] : **Kara Ali R.**, Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2002.
- [7] : **Bessa-Badreddine A.**, Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2004.
- [8] : **Cyr M., Lawrence P., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars, Quantification of the physical effects of inert materials in relation on short term hydration, Cement and concrete research Vol. 35, p. 719-730, 2005.
- [9] : **Lawrence P., Cyr M., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars, Effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, Cement and concrete research Vol. 35, p. 1092-1105, 2005.
- [10] : **Nonat A.**, Interaction between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) In the case of tricalcium silicate, Materials and structures Vol. 27 (168), p. 187-195, 1994.
- [11] : **Kara Ali R., Gallias J. L.**, Une approche méthodologique des problèmes de formulation des bétons avec additions minérales fines et ultra fines, 16^{ème} rencontres universitaires de Génie Civil – Les ouvrages dans leur environnement, Reims, 28-29 avril 1998, Actes édités par l'association universitaire du Génie Civil, Vol. 1, p. 106-113, 1998.
- [12] : **Cyr M., Lawrence P., Ringot E., Carles-Gibergues**, Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales, Materials and Structures, Vol. 33, p. 466-472, 2000.

-
- [13] : **Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B.**, The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars, *Cement and concrete research* Vol. 36, p. 1719-1726, 2006.
- [14] : **Grzeszczyk S., Lipowski G.**, Effect of content and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes, *Cement and concrete research* Vol. 27, p. 907-916, 1997.
- [15] : **Lewandowski R.**, Versuchsreihe mit Flugasche - Einfluss von Flugasche-Stäuben unterschiedlicher Qualität auf die betoneigenen schafften, *Baugewerbe*, p. 44-49, 1983.
- [16] : **Lange F., Mortel N., Rudert V.**, Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, *Cement and concrete research* Vol. 27, p. 1481-1488, 1997.
- [17] : Ramachandran V. S., **Mortel N., Rudert V.**, *Concrete admixtures Handbook, Properties, Science and Technology*, Noyes Publication, Park Ridge, NJ, 1995.
- [18] : **Collins F., Sanjayan J. G.**, Effect of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder, *Cement and concrete research* Vol. 29, p. 459-462, 1999.
- [19] : **Bajou L., Youjun X., Qianlian Y.**, Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete, *Cement and concrete research* Vol. 30, p. 1489-1493, 2000.
- [20] : **Kronlof A.**, Effect of very fine aggregate on concrete strength, *Materials and Structures*, Vol. 27, p. 15-25, 1994.
- [21] : **Kwan A. K. H.**, Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidating concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, p. 620-627, 2000.
- [22] : **De Larard F., Moreau A., Buil M. and Paillere A. M.**, Improvement of mortars and concretes really attributable to condensed silica fume, 2nd International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans, Vol. 2, p. 959-971, Madrid 1986.
- [23] : **Yijin L., S., Chiqiong Z., Yingli G.**, The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar and concrete, *Proceedings of the international work shop of sustainable development and concrete technology*, p. 339-345, Beijing 2004.
- [24] : **Zhang X., Han J.**, The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cement and concrete research* Vol. 30, p. 827-830, 2000.
- [25] : **Gallias J. L., Kara Ali R. and Bigas J. P.**, The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 p. 1543–1549, 2000.
- [26] : **Lilkov V., Dimitrova E., Petrov O.**, hydration process of cement containing fly ash and silica fume : the first 24 hours, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, p. 577-592, 1997.

-
- [27] : **Hanna B.**, Contribution à l'étude de la structuration des mortiers de ciment Portland contenant des particules ultra fines, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 1987.
- [28] : **Jiang S. et Van Damme H.**, Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C_3S , Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, 1996.
- [29] : **Ramichan T., Thomas M. D. A., Hooton R. D.**, The effect of Pouzzolans and Slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature, Part II: Micro-structural and micro-chemical investigations, Cement and Concrete Research, Vol. 34, p. 1341-1356, 2004.
- [30] : **Manjit S., Mridul G.**, Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes, Cement and Concrete Research, Vol. 29, p. 309-314, 1999.
- [31] : **Memon A. H., Radin S. S., Zain M. F. M., Trottier J. F.**, Effect of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, Cement and Concrete Research, Vol. 32, p. 373-377, 2002.
- [32] : **Gutteridge W. A., Dalziel J. A.** Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement, Cement and Concrete Research, Vol. 20, p.778 – 782, 1990.
- [33] : **Feldman R. F. and Cheng Gi M.**, Hydration reactions in Portland cement silica fume blends, Cement and Concrete Research, Vol. 15, p. 585-592, 1985.
- [34] : **Neville A. M.**, Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Editions Eyrolles, 2000.
- [35] : **Caré S., Linder R., Baroghel Bouny V., De Larrard F., et Charonnat Y.**, Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrages d'art OA 33, février 2002.
- [36] : **Benzet J. C. and Benhassine A.**, The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder, Powder Technology, Vol. 103, p. 26-29, 1999.
- [37] : **Husson S.**, Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment - fillers: application aux mortiers, Thèse de l'école normale supérieure des mines de Saint-Étienne, 1991.
- [38] : **Appa Rao G.**, Development of strength with age of mortars containing silica fume, Cement and Concrete Research, Vol. 31, p. 1141-1146, 2001.
- [39] : **Demirboga R.**, Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar, Energy and buildings Vol. 35, p. 189-192, 2003.
- [40] : **Soroka I., Stern N.**, Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement, Cement and concrete research Vol. 6 (3), p. 367-376, 1976.
- [41] : **Dreux G., Fiesta J.**, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Editions Eyrolles, 1998.

-
- [42] : **Faury J.**, Le béton. Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, Editions Dunod, 1953.
- [43] : **De Larrard F.**, Prédiction des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice – Une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret, Annales ITBTP, N° 483, p. 92-97, 1990.
- [44] : **Kadri E. H.**, Contribution à l'étude de l'influence de la fumée de silice sur les caractéristiques des bétons à hautes performances, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 1998.
- [45] : **Babu K. C., Rao G. S. N.**, Efficiency of fly ash in concrete with age, Cement and Concrete Research, Vol. 26, p. 465-474, 1996.
- [46] : **Goplan M. K.**, Efficiency, skin strength and sorptivity of fly ash concretes, Materials and Structures, Vol. 28, p. 235-240, 1995.
- [47] : **Shannag J. M., Yeginobali A.**, Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan, Cement and Concrete Research, Vol. 25, p. 647-657, 1995.
- [48] : **Zhang M. H., Malhorta V. M.**, Characteristics of thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 25, p. 1713-1725, 1995.
- [49] : **Bai J., wild S., Sabir B.B. and Kinuthia J. M.**, Workability of concrete incorporating pulverised fly ash and metakaolin, Magazine of concrete research N° 51, p. 207-216, 1999.
- [50] : **Dhir R. K., Hubbard F.H., Munday J. G. L., Jones M. R. and Durden S.**, Contribution of PFA on concrete workability and strength development, Cement and Concrete Research, Vol. 18, p. 277-289, 1988.
- [51] : **Gallias J. L., Kara Ali R.**, A question of water, Concrete Engineering International, Palladian Publications, Vol. 3, London, March 1999.
- [52] : **Nedhi M., Mindess S. and Aitcin P. C.**, Rheology of high performance concrete: effect of ultra fine particles, Cement and Concrete Research, Vol. 28, p. 687-697, 1998.
- [53] : **Ferraris C. F., Obla K. H., and Hill R.**, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement pastes and concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 31, p. 245-255, 2001.
- [54] : **Houhou M. N., Mezghiche B.**, Influence de l'ajout pouzzolanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment, 2^{ème} colloque Maghrébin en Génie Civil, p. 129-137, Biskra, Algérie, 10-11 décembre 2002.
- [55] : **Belhachemi B.**, Influence de la surface spécifique Blaine sur les résistances d'un ciment pouzzolanique, Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 6-7 décembre 2005.

-
- [56] : **Aichouba A., Ghrici M. et Benaissa A.**, Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 6-7 décembre 2005.
- [57] : **Ezziane K., Bougara A. et kassoul A.**, Efficacité du laitier d'El Hadjar par le concept du liant équivalent, 2^{ème} colloque Maghrébin en Génie Civil, p. 87-96, Biskra, Algérie, 10-11 décembre 2002.
- [58] : **Kreijger P. C.**, Plasticizers and dispersing admixtures, proceedings of the International Congress on admixtures, London, 16-17 April 1980, the construction press Ltd, Ed., Lancaster, p. 1-16, England, 1980.
- [59] : **Rixom M. R., Mailvaganam N. P.**, Chemical admixtures for concrete, E & F. N. Spon, Ed., London, 1986.
- [60] : **Dodson V. H.**, Concrete admixtures, Van Nostrand Reinhold, Structural Engineering Series, Ed., New York, 1990.
- [61]: **Prior M. E., Adams A. B.**, Introduction to producers papers on water reducing admixtures and set retarding admixtures for concrete, ASTM Sp. Tech. Publ. No. 266, P. 170-9, 1960.
- [62]: **Foster B.**, Effect of water reducing admixtures and set retarding admixtures on properties of concrete, ASTM Sp. Tech. Pub.. No. 266, P. 240-6, 1960.
- [63]: **Hewelt P. C.**, Cement admixtures, Use and Applications, 2nd Ed. for the cement admixtures Association, p. 166, Longham Harlow, 1988.
- [64] : **Emoto T., Bier T. A.**, Rheological behaviour as influenced by plasticizers and hydration kinetics, Cement and concrete research Vol. 37, p. 647-654, 2007.
- [65]: **Jolicoeur C., Nkinamubanzi P. C., Simard M. A. and Piotte M.**, Progress in understanding the functional properties of superplasticizers in fresh concrete, Fourth CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Montréal, ACI, ED., SP-148, p. 63-88, October 1994.
- [66]: **Fernon V.**, Etude de nouveaux solides lamellaires obtenus par co-précipitation d'hydrate aluminocalcique et de sulfonate aromatique, thèse, Université d'Orléans, Novembre 1994.
- [67]: **Meyer A.**, Experiences in the use of superplsticizers in Germany, in Superplasticizers in concrete, ACI SP-62, P. 21-36, Detroit, Michigan, 1979.
- [68]: **Boussant J. B., Vernet C. and Defosse C.**, Growth of ettringite in diffusion controlled conditions. Influence of additives on the crystal morphology, Proceedings of the eleventh international conference on cement microscopy, p. 186-197, New Orleans, Louisiana, 10-13 April 1989.

-
- [69] : **De Larrard F., Bosc F., Catherine C.**, La nouvelle méthode des coulis AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, Bulletins des Laboratoires des ponts et chaussées, 1996.
- [70] : **Thermkhajornkit P., Nawa T.**, The fluidity of flyash-cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer, Cement and concrete research Vol. 34, p. 1017-1024, 2004.
- [71]: **Ramachandran V. S et al.**, Superplasticizers: Properties and applications in concrete, Minister of Public Works and Government services, p. 97-100, Canada, 1998.
- [72] : **Aitcin P. C.**, Les superplastifiants : des réducteurs d'eau pas comme les autres, Recueil de conférences présentées à l'université de Sherbrooke, 1990.
- [73] : **De Larrard F.**, Formulation et propriétés constructives des bétons à très hautes performances, Rapport de recherche des LPC N° 149, LCPC, Paris, mars 1989.
- [74] : **Ramachandran V. S.**, Use of superplasticizers in concrete, Il Cemento, Vol. 3, p. 273-298, 1987.
- [75]: **Pailhere A. M.**, Influence des résines de synthèse fluidifiantes sur la rhéologie et la déformation des pâtes de ciment avant et en cours de prise, 7^{ème} Congrès International de la chimie des ciments, Vol. III, p. 186-191, Paris, 1980.
- [76] : **Hanna E., Luka K. and Aitcin P. C.**, Rheological behaviour of Portland cement in the presence of a superplasticizer, Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, 3rd International congress, p. 171-188, CANMET/ACI, Ottawa, 1989.
- [77]: **Uchikawa H., Uchida S. and Hanehara S.**, Flocculation structure of fresh cement paste determined by sample freezing-back scatterd electron image method, Il Cemento, Vol. 84, p. 3-22, Jan-mar 1987.
- [78] : **Erdogdu S.**, Compatibility of superplasticizers with cements different in composition, Cement and concrete research Vol. 30, p. 767-773, 2000.
- [79]: **Chandra S., Björnström J.**, Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars – part II, Cement and Concrete Research, Vol. 32, p.1613–1619, 2002.
- [80]: **Aiad I.**, Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 33, p. 1229 – 1234, 2003.
- [81]: **Çolak A.**, Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan, Cement and Concrete Research, Vol. 33, p. 585 – 593, 2003.
- [82]: **Golaszewski et Szwabowski**, Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, Cement and Concrete Research, 2469, 2003.
- [83] : **Park et al**, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, Cement and Concrete Research, Vol. 35, p. 842 – 849, 2004.

-
- [84] : **Corradi M., Khurana R., Magarotto R.**, New superplasticizers for the total control of performances of fresh and hardened concrete, Proceedings of the International Conference on Admixtures-enhancing, Concrete performances, p. 1-10, Skotland, U.K., 6 july 2005.
- [85] : **Plank J., Hirsch C.**, Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption, Cement and concrete research Vol. 37, p. 537-542, 2007.
- [86] : **Magarotto R., Moratti F., Zeminian N.**, Enhancing the compatibility of superplasticizers with cements, Proceedings of the International Conference on Admixtures-enhancing, Concrete performances, p. 21-33, Skotland, U.K., 6 july 2005.
- [87] : **Falikman V. R., Sorokin Y. V., Vainer A. Y., bashlykov N. F.**, New high performance polycarboxylate superplasticizers based on derivative copolymers of maleinic acid, Proceedings of the International Conference on Admixtures-enhancing, Concrete performances, p. 41-46, Skotland, U.K., 6 july 2005.
- [88] : **Sakai E., Kasuga T., Sugiyama T., Asaga K., Daimon M.**, Influence of superplasticizers on the hydration of cement and pore structure of hardned cement, Cement and concrete research Vol. 36, p. 2049-2053, 2006.
- [89]: **Brooks J. J. Wainwright P. J. and Neville A. M.**, Time depend properties of concrete containing a superplasticizing admixture, in Superplasticizers in Concrete, ACI SP-62, p. 293-314, Detroit, Michigan, 1979.
- [90]: **Malhorta V. M.**, Superplasticizers in concrete, CANMET report MRP/MSL 70-213, 20 pp., Canada centre for mineral and energy technology, Ottawa, August 1979.
- [91]: **Malhorta V. M.**, Superplasticizers : A global review with emphasis on durability and innovative concretes, in superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Proc., 3rd International conference, Ottawa, Ed. V. M. Malhorta, ACI SP-119, p. 1-17, Detroit, Michigan, 1989.
- [92] : **Zeghichi L.**, Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé, Thèse de doctorat à l'Université de Biskra, 2006.

LISTE DES PUBLICATIONS INTERNATIONALES ISSUES DE LA THESE

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Analysis of the effects of mineral admixtures on the strength of mortars : Application of the predictive model of Feret, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 8, N° 2, p. 87-96, 2007 (ISSN 1392-3730 print, 1822-3605 online).

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Effects of the admixtures reactivity on the strength of mortars : Application of the predictive model of Bolomey, Asian Journal of Engineering (Building and Housing), Vol. 8, N° 1, p.13-24, 2007 (ISSN 1563-0854).

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Effects of mineral admixtures reactivity on mortars : Application of the predictive model of Bolomey with the concept of equivalent binder, World Journal of Engineering, Vol. 3, N° 4, p.54-65, 2006 (ISSN 1708-5284).

LISTE DES COMMUNICATIONS INTERNATIONALES ISSUES DE LA THESE

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Evaluation of the admixtures reactivity in the cementing materials : Application of the predictive model of Feret, Materiais 2007, Porto, Portugal, 1-4 April 2007.

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Contribution of the chemical reactivity of admixtures on the improvement of the cementing materials properties, 11th APCCHE Congress, Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30 August 2006.

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Evaluation of the physical and chemical actions of the fine and ultra-fine admixtures on Mortars, 7th International Congress of Civil Engineering , Tehran, Iran, 8-10 May 2006.

A. Boudchicha, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Utilisation d'une nouvelle approche méthodologique pour l'évaluation de l'effet des additions minérales sur les propriétés des mélanges cimentaires , Colloque Méditerranéen sur les matériaux, CMEDIMAT 2005, Oran, Algérie, 06-07 Décembre 2005.

LISTE DES PUBLICATIONS INTERNATIONALES ISSUES DE LA THESE

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Analysis of the effects of mineral admixtures on the strength of mortars : Application of the predictive model of Feret, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 8, N° 2, p. 87-96, 2007 (ISSN 1392-3730 print, 1822-3605 online).

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Effects of the admixtures reactivity on the strength of mortars : Application of the predictive model of Bolomey, Asian Journal of Engineering (Building and Housing), Vol. 8, N° 1, p.13-24, 2007 (ISSN 1563-0854).

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Effects of mineral admixtures reactivity on mortars : Application of the predictive model of Bolomey with the concept of equivalent binder, World Journal of Engineering, Vol. 3, N° 4, p.54-65, 2006 (ISSN 1708-5284).

LISTE DES COMMUNICATIONS INTERNATIONALES ISSUES DE LA THESE

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Evaluation of the admixtures reactivity in the cementing materials : Application of the predictive model of Feret, Materiais 2007, Porto, Portugal, 1-4 April 2007.

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Contribution of the chemical reactivity of admixtures on the improvement of the cementing materials properties, 11th APCCHE Congress, Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30 August 2006.

A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Evaluation of the physical and chemical actions of the fine and ultra-fine admixtures on Mortars, 7th International Congress of Civil Engineering , Tehran, Iran, 8-10 May 2006.

A. Boudchicha, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Utilisation d'une nouvelle approche méthodologique pour l'évaluation de l'effet des additions minérales sur les propriétés des mélanges cimentaires , Colloque Méditerranéen sur les matériaux, CMEDIMAT 2005, Oran, Algérie, 06-07 Décembre 2005.