

**UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**

**Faculté de génie**

**Département de génie civil**

**PROPRIÉTÉS DE BÉTONS DE CENDRES VOLANTES  
PROVENANT DE L'INCINÉRATION DES BOUES DE DÉSENCRAGE  
DES USINES DE COGÉNÉRATION**

**Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil**

**Julie ROBY**

**Jury: Arezki TAGNIT-HAMOU (directeur)  
Richard GAGNÉ  
Alexandre PAVOINE  
Nikola MIKANOVIC**



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-83732-0

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-83732-0

**NOTICE:**

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

**AVIS:**

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

**Canada**

# RÉSUMÉ

Le développement durable et les conceptions plus écologiques sont devenus très présents dans le monde du génie civil. Cependant, un des matériaux de construction les plus utilisés figure parmi les plus polluants. En effet, la production du ciment, l'ingrédient clé du béton, est responsable d'une quantité importante d'émission de CO<sub>2</sub>. Une solution est de remplacer une partie du ciment par des ajouts cimentaires provenant de sous-produits industriels, comme les cendres volantes provenant de la combustion du charbon. Au Québec, ce type d'ajout cimentaire n'est pas disponible localement. Une autre avenue est cependant possible, avec la combustion de biomasse sur un lit fluidisé. L'usine de pâtes et papiers Kruger, à Bromptonville, Québec, a récemment construit une usine de cogénération afin de valoriser ses boues de désencrage, ses boues primaires et secondaires et ses résidus de bois. À différents moments de la production, l'usine a produit six différentes cendres. Les températures de combustion ainsi que la provenance et les dosages en matières combustibles ont varié et produit des cendres ayant différentes propriétés dans les bétons.

La présente recherche a tenté d'étudier et de comprendre la variation des propriétés sur bétons des différentes cendres pour ainsi faire un choix optimal selon les matières premières et les températures de combustion. Deux rapports E/L ont été testés; 0,55 et 0,4. Un taux de remplacement du ciment par les cendres de 20% a été choisi à chaque fois. Les résultats montrent que les cendres demandent une plus grande quantité de superplastifiant, qui semble être reliée à la quantité de particules inférieures à 3 µm. Des bétons formulés avec certaines cendres ont des résistances mécaniques très près ou supérieures au témoin dès 1 jour, tandis que d'autres ont de plus faibles propriétés mécaniques. La quantité de chaux libre présente dans les cendres semble avoir un effet bénéfique sur les résistances. Les perméabilités aux ions chlore à 28 jours sont souvent plus élevées que le témoin, mais se rapprochent ou sont plus faibles dans certains cas à 91 jours. Il est à noter que du gonflement et des microfissures apparaissent avec certaines cendres. Étonnamment, les cendres contenant le plus de chaux libre sont celles montrant le moins de gonflement.

Le projet a aussi tenté d'étudier la compatibilité avec quatre superplastifiants de type polycarboxylate. Deux des six cendres ont été sélectionnées pour faire des bétons de rapport E/L de 0,4, toujours avec un taux de remplacement de 20 %. Parmi les quatre superplastifiants étudiés, seul le Glenium 7102 montrait une bonne rétention de l'affaissement avec les deux cendres. Le Viscocrete 2100 et le Adva 405 semblaient accentuer les gonflements et les microfissures observés précédemment.

Finalement, des mélanges ternaires de rapport E/L de 0,4 ont été faits afin de tenter de diminuer la variabilité des performances entre les cendres. Des combinaisons ont été faites avec du métakaolin, du laitier, de la fumée de silice et une cendre volante normalisée de classe F. Il a été possible de conclure qu'une combinaison entre les cendres de Kruger et une cendre normalisée de classe F donne les mélanges les plus robustes.

Mots-clés : Ajout cimentaire alternatif, Cendre volante, Boues de désencrage, Béton, Résistance à la compression, Perméabilité aux ions chlore



# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Arezki Tagnit-Hamou, pour m'avoir intégré à son équipe et permis d'allier les domaines du béton et du développement durable. Son expertise, sa disponibilité et ses qualités humaines ont fait de mon expérience quelque chose d'enrichissant dans lequel je me suis épanouie.

Merci aussi à mon jury, tout particulièrement au professeur Richard Gagné, ing. PhD. et M. Alexandre Pavoine, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, pour avoir accepté de lire et corriger mon mémoire.

Un remerciement tout particulier aux techniciens du laboratoire de béton, Ghislaine Luc, Denis Bolduc, Rajko Vojnovic et Sylvain Roy, qui se sont dévoués tout au long de mon projet et qui ont été d'une aide précieuse.

Je tiens aussi à remercier mes deux collègues, Ailing Xie et Tanya Davidenko, qui ont travaillé au sein du même grand projet. Nous serons à jamais la meilleure équipe de Krugirlz!

Je tiens aussi à souligner une belle collaboration avec les gens de Kruger inc., particulièrement M. René Hamel, ing., assistant surintendant centrale thermique, qui a été une source essentielle de connaissances et d'informations et M. François Paradis, ing., directeur des services, qui a mené avec brio les rencontres hebdomadaires du groupe de travail sur les cendres.

Finalement, ce projet n'aurait pas été possible sans l'appui financier de Kruger inc. et du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG).



# TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE 1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1	MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2	DÉFINITION ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE.....	2
1.3	PLAN DU DOCUMENT.....	3
<b>CHAPITRE 2</b>	<b>ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>5</b>
2.1	HYDRATATION DU CIMENT ET DES AJOUTS CIMENTAIRES.....	5
2.2	AJOUTS CIMENTAIRES NORMALISÉS ET ALTERNATIFS .....	6
2.2.1	<i>Revue générale</i> .....	6
2.2.2	<i>Cendres volantes normalisées</i> .....	9
2.2.3	<i>Cendres volantes alternatives</i> .....	12
2.2.4	<i>Influence du mode de combustion</i> .....	12
2.3	CVA PROVENANT DE L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS.....	17
2.4	EFFETS SUR LES SYSTÈMES CIMENTAIRES .....	18
2.4.1	<i>Caractérisation</i> .....	19
2.4.2	<i>Propriétés à l'état frais</i> .....	22
2.4.3	<i>Résistances à la compression</i> .....	22
2.4.4	<i>Temps de prise</i> .....	26
2.4.5	<i>Chaleur d'hydratation</i> .....	28
2.4.6	<i>Autres</i> .....	29
2.5	HYPOTHÈSES.....	30
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>PROGRAMME EXPÉRIMENTAL .....</b>	<b>33</b>
3.1	DÉFINITION ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE.....	33
3.2	MÉTHODOLOGIE .....	33
3.2.1	<i>Phase I : Optimisation des cendres</i> .....	35
3.2.2	<i>Phase II : Compatibilité avec les superplastifiants</i> .....	36
3.2.3	<i>Phase III : Mélanges ternaires</i> .....	37
3.3	MATÉRIAUX UTILISÉS.....	37
3.3.1	<i>Ciment</i> .....	37
3.3.2	<i>Ajouts cimentaires</i> .....	38
3.3.3	<i>Cendres volantes Kruger</i> .....	39
3.3.4	<i>Sable</i> .....	42
3.3.5	<i>Gros granulats</i> .....	43
3.3.6	<i>Eau de gâchage</i> .....	45
3.3.7	<i>Adjuvants</i> .....	45
3.4	PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....	46
3.4.1	<i>Séquence de malaxage</i> .....	46
3.4.2	<i>Méthodes de cure et d'échantillonnage</i> .....	47
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>RÉSULTATS DE LA PHASE I – A : SUIVI DE L'AFFAISSEMENT.....</b>	<b>49</b>
4.1	MÉLANGES DE RAPPORT E/L DE 0,55.....	50
4.2	MÉLANGES DE RAPPORT E/L DE 0,4.....	52

4.3	CONCLUSIONS.....	55
<b>CHAPITRE 5</b>	<b>RÉSULTATS DE LA PHASE I – B : PROPRIÉTÉS DE LA CVK 4 .....</b>	<b>57</b>
5.1	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION .....	58
5.2	PERMÉABILITÉ AUX IONS CHLORE.....	59
5.3	CHALEUR D'HYDRATATION .....	61
5.4	CONCLUSIONS.....	62
<b>CHAPITRE 6</b>	<b>RÉSULTATS DE LA PHASE I – C : COMPARAISON DES CVK.....</b>	<b>63</b>
6.1	MÉLANGES DE RAPPORT E/L DE 0,55 .....	64
6.1.1	<i>Propriétés à l'état frais .....</i>	<i>64</i>
6.1.2	<i>Résistances à la compression .....</i>	<i>67</i>
6.1.3	<i>Perméabilités aux ions chlore .....</i>	<i>69</i>
6.2	MÉLANGES DE RAPPORT E/L DE 0,4 .....	70
6.2.1	<i>Propriétés à l'état frais .....</i>	<i>71</i>
6.2.2	<i>Résistances à la compression .....</i>	<i>73</i>
6.2.3	<i>Perméabilités aux ions chlore .....</i>	<i>75</i>
6.2.4	<i>Temps de prise.....</i>	<i>77</i>
6.3	CORRESPONDANCE AVEC LA NORME CSA A3004-E1 .....	79
6.4	CONCLUSIONS.....	80
<b>CHAPITRE 7</b>	<b>RÉSULTATS DE LA PHASE II : COMPATIBILITÉ AVEC LES SUPERPLASTIFIANTS .....</b>	<b>83</b>
7.1	PROPRIÉTÉS À L'ÉTAT FRAIS.....	85
7.2	RÉSISTANCES À LA COMPRESSION .....	87
7.3	CONCLUSIONS.....	91
<b>CHAPITRE 8</b>	<b>RÉSULTATS DE LA PHASE III : MÉLANGES TERNAIRES .....</b>	<b>93</b>
8.1	SÉRIE AVEC LA CVK 1 .....	95
8.1.1	<i>Propriétés à l'état frais .....</i>	<i>95</i>
8.1.2	<i>Résistances à la compression .....</i>	<i>97</i>
8.1.3	<i>Perméabilités aux ions chlore .....</i>	<i>98</i>
8.2	SÉRIE AVEC LA CVK 4 .....	99
8.2.1	<i>Propriétés à l'état frais .....</i>	<i>99</i>
8.2.2	<i>Résistances à la compression .....</i>	<i>101</i>
8.2.3	<i>Perméabilités aux ions chlore .....</i>	<i>102</i>
8.3	ROBUSTESSE .....	103
8.4	CONCLUSIONS.....	106
<b>CHAPITRE 9</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>109</b>
9.1	SOMMAIRE.....	109
9.2	CONTRIBUTIONS ORIGINALES.....	111
9.3	PERSPECTIVES DE RECHERCHE .....	111
<b>ANNEXE A</b>	<b>FORMULATIONS CORRIGÉES.....</b>	<b>113</b>
	<b>LISTE DES RÉFÉRENCES.....</b>	<b>117</b>

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1: RÉACTIONS D'HYDRATATION DU CIMENT ET DES AJOUTS CIMENTAIRES .....	6
FIGURE 2.2: COMPOSITION CHIMIQUE DES PRINCIPAUX AJOUTS CIMENTAIRES ET DE LA CVK (ADAPTÉ DE AÏTCIN, 2008).....	9
FIGURE 2.3: COMBUSTION SUR LIT FLUIDISÉ (ADAPTÉ DE MILLER ET TILLMAN, 2008).....	14
FIGURE 3.1: PLAN EXPÉRIMENTAL .....	34
FIGURE 3.2: DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES CENDRES KRUGER .....	42
FIGURE 3.3: DISTRIBUTION NON CUMULÉE DES PARTICULES DES CENDRES KRUGER.....	42
FIGURE 3.4: COURBE GRANULOMÉTRIQUE DU SABLE.....	43
FIGURE 3.5: COURBE GRANULOMÉTRIQUE DE LA PIERRE 5-14 MM .....	44
FIGURE 3.6: COURBE GRANULOMÉTRIQUE DE LA PIERRE 10-20 MM .....	45
FIGURE 3.7: COURBE GRANULOMÉTRIQUE COMBINÉE.....	45
FIGURE 4.1 : AFFAISSEMENT EN FONCTION DU TEMPS (E/L=0,55) .....	51
FIGURE 4.2 : ÉVOLUTION DE LA DEMANDE EN SP EN FONCTION DU TEMPS (E/C=0,55) .....	51
FIGURE 4.3 : AFFAISSEMENT EN FONCTION DU TEMPS (E/L=0,4) .....	52
FIGURE 4.4 : ÉVOLUTION DE LA DEMANDE EN SP EN FONCTION DU TEMPS (E/L=0,4) .....	53
FIGURE 4.5 : AFFAISSEMENT À 10 MINUTES (20% CVK 4, E/L=0,4) .....	54
FIGURE 4.6 : AFFAISSEMENT À 30 MINUTES (20% CVK 4, E/L=0,4) .....	54
FIGURE 4.7 : AFFAISSEMENT À 60 MINUTES (20% CVK 4, E/L=0,4) .....	55
FIGURE 5.1 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B .....	59
FIGURE 5.2 : PERMÉABILITÉ AUX IONS CHLORE DE LA PHASE I-B.....	60
FIGURE 5.3 : CHALEUR D'HYDRATATION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B .....	62
FIGURE 6.1 : DEMANDE EN SP DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	65
FIGURE 6.2 : RELATION ENTRE LA DEMANDE EN SP ET LE % PARTICULES < 3µM (E/L=0,55) .....	66
FIGURE 6.3 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DANS LE TEMPS POUR LES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	66
FIGURE 6.4 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	67
FIGURE 6.5 : RELATION ENTRE LA TENEUR EN CAO LIBRE DES CVK ET LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION (PHASE I-C, E/L=0,55) .....	68
FIGURE 6.6 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	70
FIGURE 6.7 : DEMANDE EN SP DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	71
FIGURE 6.8 : RELATION ENTRE LA DEMANDE EN SP ET LE % PARTICULES < 3µM (E/L=0,4) .....	72
FIGURE 6.9 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DANS LE TEMPS POUR LES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	72
FIGURE 6.10 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4) .....	73
FIGURE 6.11 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION PAR RAPPORT AU TÉMOIN DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	74
FIGURE 6.12 : TENEUR EN CAO LIBRE DES CVK EN FONCTION DE LA RÉSISTANCE (E/L=0,4) .....	75
FIGURE 6.13 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	76
FIGURE 6.14 : TEMPS DE PRISE DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4) .....	78
FIGURE 6.15 : PRISE DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	78
FIGURE 7.1 : DEMANDE EN SP DES MÉLANGES DE LA PHASE II .....	85
FIGURE 7.2 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DES TÉMOINS.....	86
FIGURE 7.3 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DU MÉLANGE AVEC 20% CVK 1 .....	86
FIGURE 7.4 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DU MÉLANGE AVEC 20% CVK 4.....	87
FIGURE 7.5 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION AVEC LA CVK 1 .....	88
FIGURE 7.6 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION AVEC LA CVK 4 .....	89

FIGURE 7.7 : MICROFISSURES APPARENTES (MÉLANGE AVEC 20% CVK 1 ET VISCOCRETE 2100, E/L=0,4) .....	89
FIGURE 7.8 : MICROFISSURES APPARENTES PLUS EN DÉTAIL (MÉLANGE AVEC 20% CVK 1 ET VISCOCRETE 2100, E/L=0,4) .....	90
FIGURE 7.9 : GONFLEMENT APPARENT (MÉLANGE AVEC 20% CVK 4 ET VISCOCRETE 2100, E/L=0,4) .....	90
FIGURE 7.10 : GONFLEMENT APPARENT PLUS EN DÉTAIL (MÉLANGE AVEC 20% CVK 4 ET VISCOCRETE 2100, E/L=0,4) .....	90
FIGURE 8.1 : DEMANDE EN SP DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 1 .....	96
FIGURE 8.2 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DANS LE TEMPS DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 1 .....	96
FIGURE 8.3 : RÉISTANCES À LA COMPRESSION DE LA PHASE III-AVRIL 08 .....	97
FIGURE 8.4 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DE LA PHASE III-CVK 1 .....	98
FIGURE 8.5 : DEMANDE EN SP DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 4 .....	100
FIGURE 8.6 : ÉVOLUTION DE L'AFFAISSEMENT DANS LE TEMPS DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 4 .....	100
FIGURE 8.7 : RÉISTANCES À LA COMPRESSION DE LA PHASE III-CVK 4 .....	101
FIGURE 8.8 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DE LA PHASE III-CVK 4 .....	103
FIGURE 8.9 : PERMÉABILITÉ AUX IONS CHLORE À 28 JOURS SELON LES MÉLANGES .....	104
FIGURE 8.10 : RÉISTANCE À LA COMPRESSION À 28 JOURS SELON LES MÉLANGES .....	104
FIGURE 8.11 : DEMANDE EN SP SELON LES MÉLANGES .....	105

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 : EXIGENCES CHIMIQUES POUR LES AJOUTS CIMENTAIRES NORMALISÉS.....	7
TABLEAU 2.2 : EXIGENCES PHYSIQUES POUR LES AJOUTS CIMENTAIRES NORMALISÉS.....	7
TABLEAU 2.3 : COMPOSITION TYPIQUE DES DIFFÉRENTES CENDRES VOLANTES NORMALISÉES.....	10
TABLEAU 2.4 : COMPOSITION CHIMIQUE DE DIFFÉRENTES CVA PROVENANT DE L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS .....	20
TABLEAU 3.1 : ESSAIS DE LA PHASE I-A .....	35
TABLEAU 3.2 : ESSAIS DE LA PHASE I-B.....	35
TABLEAU 3.3 : ESSAIS DE LA PHASE I-C.....	36
TABLEAU 3.4 : ESSAIS DE LA PHASE II.....	36
TABLEAU 3.5 : ESSAIS DE LA PHASE III.....	37
TABLEAU 3.6 : COMPOSITION CHIMIQUE ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU CIMENT .....	38
TABLEAU 3.7 : CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DES AJOUTS CIMENTAIRES.....	39
TABLEAU 3.8 : CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DES CVK .....	40
TABLEAU 3.9 : CONDITIONS DE PRODUCTION DES CVK.....	41
TABLEAU 3.10 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DU SABLE.....	43
TABLEAU 3.11 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE ET PROPRIÉTÉS DES GROS GRANULATS.....	44
TABLEAU 3.12 : PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS ADJUVANTS UTILISÉS.....	46
TABLEAU 3.13 : SÉQUENCE DE MALAXAGE POUR LES BÉTONS.....	47
TABLEAU 3.14 : MÉTHODES DE CURE ET D'ÉCHANTILLONNAGE .....	47
TABLEAU 4.1 : COMPOSITION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-A.....	49
TABLEAU 4.2 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE I-A .....	50
TABLEAU 5.1 : COMPOSITION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B.....	57
TABLEAU 5.2 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B.....	57
TABLEAU 5.3 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B.....	58
TABLEAU 5.4 : NIVEAUX DE PERMÉABILITÉ EN FONCTION DE LA CHARGE EN COULOMBS.....	59
TABLEAU 5.5 : PERMÉABILITÉ AUX IONS CHLORES DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B .....	60
TABLEAU 6.1 : COMPOSITION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C.....	63
TABLEAU 6.2 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	64
TABLEAU 6.3 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	67
TABLEAU 6.4 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,55).....	69
TABLEAU 6.5 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	70
TABLEAU 6.6 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	73
TABLEAU 6.7 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C (E/L=0,4).....	76
TABLEAU 6.8 : SPÉCIFICATIONS ET EXIGENCES POUR LES ESSAIS SUR BÉTONS (SELON LA NORME CSA A3004-E1).....	80
TABLEAU 7.1 : COMPOSITION DES MÉLANGES DE LA PHASE II .....	84
TABLEAU 7.2 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE II.....	84
TABLEAU 7.3 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE II .....	88
TABLEAU 8.1 : COMPOSITION DES MÉLANGES DE LA PHASE III.....	94
TABLEAU 8.2 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 1 .....	95
TABLEAU 8.3 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 1.....	97
TABLEAU 8.4 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 1.....	98
TABLEAU 8.5 : DONNÉES À L'ÉTAT FRAIS DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 4 .....	99
TABLEAU 8.6 : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 4.....	101
TABLEAU 8.7 : PERMÉABILITÉS AUX IONS CHLORE DES MÉLANGES DE LA PHASE III-CVK 4.....	102
TABLEAU 8.8 : POURCENTAGE D'ÉCART ENTRE LES PERFORMANCES DES DEUX CVK .....	105

TABLEAU A.1 : FORMULATIONS CORRIGÉES DES MÉLANGES DE LA PHASE I-A .....	113
TABLEAU A.2 : FORMULATIONS CORRIGÉES DES MÉLANGES DE LA PHASE I-B .....	113
TABLEAU A.3 : FORMULATIONS CORRIGÉES DES MÉLANGES DE LA PHASE I-C .....	114
TABLEAU A.4 : FORMULATIONS CORRIGÉES DES MÉLANGES DE LA PHASE II.....	114
TABLEAU A.5 : FORMULATIONS CORRIGÉES DES MÉLANGES DE LA PHASE III.....	115

# LISTE DES ACRONYMES

- AC : Ajout cimentaire
- ACA : Ajout cimentaire alternatif
- BFBC : « Bubbling fluidized bed combustion », pour combustion sur lit fluidisé bouillonnant
- BHP : Béton haute performance
- BO : Béton ordinaire
- CFBC : « Circulating fluidized bed combustion », pour combustion sur lit fluidisé circulant
- CV : Cendre volante
- CVA : Cendre volante alternative
- CVC : Cendre volante normalisée de classe C
- CVF : Cendre volante normalisée de classe F
- CVK : Cendre volante de Kruger
- CVN : Cendre volante normalisée
- CSA : « Canadian Standard Association », pour l'Association Canadienne de Normalisation
- FBC : « Fluidized bed combustion », pour combustion sur lit fluidisé
- FS : Fumée de silice
- GES : Gaz à effet de serre
- L : Laitier
- MK : Métakaolin
- PAF : Perte au feu
- SP : Superplastifiant



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte et problématique

La production d'une tonne de ciment, l'ingrédient clé du béton, génère environ une tonne de gaz à effet de serre (GES). En améliorant les performances technologiques et en utilisant des combustibles moins polluants pour la cuisson du cru, il est possible de réduire ces émissions à environ 0,72 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment [Habert et Roussel, 2008]. Mais ces améliorations ont des limites, puisque la majeure partie des émissions provient de la décarbonatation du calcaire, nécessaire à la fabrication du clinker Portland. Une des possibilités pour réduire ces émissions consiste à utiliser des ajouts cimentaires (AC) provenant de sous-produits industriels en remplacement du ciment dans les bétons. Ces ajouts permettent de diminuer la quantité de ciment utilisée, sans compromettre la qualité des bétons.

L'Association Canadienne de Normalisation, ou « Canadian Standard Association » (CSA) a normalisé quelques sous-produits industriels pouvant être utilisés comme AC dans les bétons. Parmi ceux-ci existent les cendres volantes normalisées (CVN), provenant des gaz de sortie des centrales thermiques au charbon. Dans un contexte québécois, la majorité de l'électricité produite est d'origine hydraulique. La disponibilité des CVN nécessite donc leur importation de l'Ontario, des Maritimes et des États-Unis. L'importation est coûteuse et surtout moins écologique. Il est donc nécessaire de développer des produits locaux plus abordables. Les cendres volantes de co-combustion, provenant d'une source différente que le charbon, peuvent répondre à ce besoin en tant qu'ajout cimentaire alternatif (ACA). Depuis 2008, la CSA a d'ailleurs ajouté un volet concernant les ACA à sa norme sur les matériaux cimentaires [CSA, 2008a].

De son côté, l'usine de pâtes et papier Kruger de Bromptonville, au Québec, produit plus de 526 000 tonnes de papier journal et de pâte recyclée chaque année [Kruger, 2005a]. Elle génère donc une quantité importante de déchets, comme des boues primaires et secondaires,

des boues de désencrage et des résidus de bois. En 2007, l'entreprise a décidé de construire une centrale thermique afin d'utiliser ces déchets comme matière combustible. En utilisant le potentiel calorifique de ses déchets, la centrale permet de réduire sa consommation annuelle de combustible fossile de 25 millions de litres de mazout et de réduire ses émissions de GES de 83 000 tonnes annuellement [Kruger, 2005b]. Cependant, la combustion de ces résidus de biomasse génère un autre type de déchet. En effet, la teneur moyenne en matière non organique est d'environ 5 % pour le bois, 15 % pour les boues primaires et secondaires et 40 % pour les boues de désencrage. Même si le volume total de déchets est diminué, une quantité importante de cendres volantes, soit environ 40 000 tonnes par année, est générée et doit être enfouie.

Les boues primaires et secondaires proviennent des eaux usées de l'usine tandis que les boues de désencrage sont obtenues lorsque l'encre du papier recyclé doit être retirée. Elles sont composées de matières organiques, qui seront brûlées dans le processus de combustion, et de matières minérales non organiques, qui seront transformées en cendres. Ces matières minérales sont principalement composées de kaolinite, de carbonate de calcium et de talc. Selon leur teneur en minéraux et leur condition de combustion, les cendres produites peuvent constituer un matériau pouzzolanique à haut potentiel [Pera et Amrouz, 1998]. Dans le but de donner une valeur ajoutée aux cendres récupérées, la compagnie Kruger a donc mandaté l'Université de Sherbrooke afin d'examiner son potentiel d'utilisation à l'intérieur des bétons comme ACA.

## **1.2 Définition et objectifs du projet de recherche**

Globalement, ce projet tente de vérifier le potentiel d'utilisation des cendres volantes de Kruger (CVK) comme ACA. Les premiers essais effectués montrent un très bon potentiel [Xie, 2009]. Cependant, il semble y avoir quelques différences dans le comportement des différentes cendres produites. En effet, l'usine de Bromptonville brûle non seulement ses propres boues, mais aussi celles d'autres usines situées ailleurs au Québec. Bien que ces boues soient de la même nature que celles de Bromptonville, il y a certaines différences. De plus, la proportion de boues primaires et secondaires et de boues de désencrage brûlées ne sont pas toujours les mêmes, selon les moments de la production. Il est aussi possible d'avoir certaines

variations de la température de combustion. Les cendres produites ont donc des caractéristiques différentes, ce qui peut donner des performances différentes sur les bétons. Avec ce projet, l'objectif sera d'étudier plus en profondeur ces différences. L'objectif ultime étant d'en arriver à une cendre optimale ayant le meilleur potentiel possible pour l'usage dans les bétons.

Afin d'y arriver, la première phase sera de faire l'inventaire des cendres produites et de leurs caractéristiques et de les tester à l'intérieur de bétons à des taux de remplacement égaux. Cette étape est nécessaire afin de choisir la cendre optimale. Par la suite, une seconde phase tentera de vérifier la compatibilité des cendres avec différents superplastifiants (SP). Finalement, une troisième phase aura pour objectif de voir s'il est possible de limiter les variations entre les cendres en les introduisant dans des systèmes ternaires.

Quelques recherches ont étudié des cendres provenant de l'industrie des pâtes et papiers à l'intérieur de systèmes cimentaires. Des recherches proviennent notamment de l'Université de Glamorgan au Royaume-Uni, de l'Espagne, de la France, de la Corée et maintenant du Canada grâce aux travaux de Mme Xie. Cependant, aucune de ces recherches n'a vraiment étudié la performance sur bétons de cendres provenant de différentes sources de boues. Ils n'ont donc pas observé de variations sur leur performance. Certains auteurs avaient étudié l'effet de la température de combustion sur la performance [Pera et Amrouz, 1998, Pera et Ambroise, 1999, Vigil de la Villa *et al.*, 2007, Frias *et al.*, 2008a, Rodriguez *et al.*, 2008 et Garcia *et al.*, 2008], mais pas l'effet des différentes sources ou proportions de boues, ni la compatibilité avec des SP. Certains auteurs ont aussi fait des mélanges ternaires, mais seulement avec du laitier [Kinuthia *et al.*, 2001, O'Farrell *et al.*, 2002, Bai *et al.*, 2003, Chaipanich *et al.*, 2005 et Mozaffari *et al.*, 2009].

### **1.3 Plan du document**

Ce projet de maîtrise est effectué à l'intérieur du laboratoire des Matériaux Cimentaires Alternatifs de l'Université de Sherbrooke, sous la supervision du professeur M. Arezki Tagnit-Hamou. Plus précisément, c'est un projet dans le domaine du béton, sur les ACA. Ce mémoire traite tout d'abord de l'état de l'art des AC, plus particulièrement des CVN et des CVA, puis des cendres provenant de l'industrie des pâtes et papiers. Le troisième chapitre présente tout le

programme expérimental, incluant les essais effectués pour chacune des phases du projet et les matériaux utilisés. Les chapitres 4 à 8 se consacrent à l'analyse des résultats de chacune des phases du projet. Finalement, les conclusions et recommandations du projet sont énoncées au chapitre 9 avant de terminer par l'Annexe A et les références.

# CHAPITRE 2

## ÉTAT DE L'ART

Le mandat a pour but d'étudier le potentiel d'utilisation des CVK comme ACA en remplacement du ciment à l'intérieur des bétons. Il sera d'abord essentiel de traiter des principes de base de l'hydratation du ciment et des AC. Une brève revue des AC normalisés couramment utilisés dans les bétons sera effectuée, en portant une attention plus particulière sur les CVN.

Les cendres testées à l'intérieur de ce projet proviennent d'une centrale thermique à la biomasse. Elles sont donc différentes des CVN, qui proviennent du charbon. En plus de provenir d'une source de combustible différente, elles sont aussi issues d'un mode de combustion différent. En effet, les CVN sont obtenues par la pulvérisation du charbon, tandis que les CVK sont obtenues par la combustion de la biomasse sur un lit fluidisé bouillonnant. Pour ces raisons, les CVK ne peuvent être considérées comme CVN, mais plutôt comme une CVA. Il y aura donc une brève revue générale sur les ACA en portant une attention plus particulière sur les CVA. L'influence du mode de combustion sera aussi abordée.

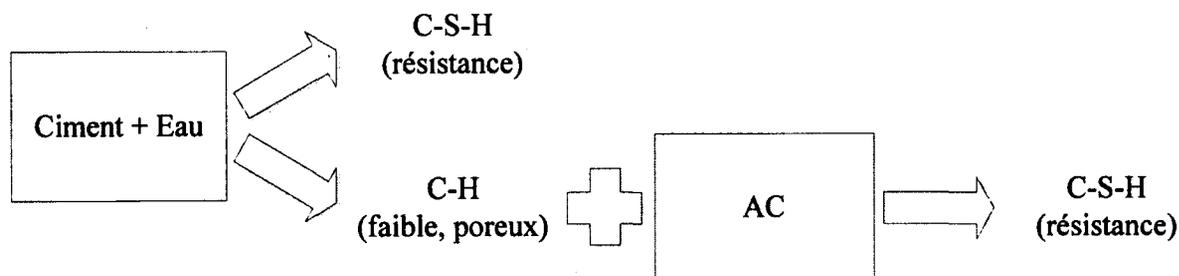
Enfin, une section sera dédiée au cas particulier des cendres provenant de l'incinération des boues de désencrage et des boues mixtes. Il sera question des études faites sur l'utilisation de ce type de cendres en remplacement du ciment. Il sera ainsi possible de voir comment les résultats du présent projet se situent par rapport aux études déjà publiées dans le même domaine.

### 2.1 Hydratation du ciment et des ajouts cimentaires

Le processus d'hydratation du ciment est le principe fondamental de la production du béton. Elle génère des gels de silicate de calcium hydratés (C-S-H), partie résistante et imperméable du béton, et de la chaux hydratée (CH), partie plus poreuse et perméable de la matrice cimentaire.

Les AC peuvent avoir des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Dans le premier cas,

ils fabriqueront des produits d'hydratation similaires au ciment. Dans le deuxième cas, au lieu de produire de la chaux, ce type de réaction en consomme pour produire d'autres C-S-H. La Figure 2.1 illustre les réactions se produisant lors de l'hydratation du ciment et des AC pouzzolaniques.



**Figure 2.1: Réactions d'hydratation du ciment et des ajouts cimentaires**

L'utilisation des AC est donc avantageuse à plusieurs niveaux. Non seulement la réaction pouzzolanique permet d'améliorer certaines propriétés du béton en formant des produits plus résistants, mais l'utilisation d'AC réduit la quantité de ciment utilisé, donc la quantité d'émission de GES. De plus, en étant utilisés à l'intérieur des bétons, ces sous-produits évitent d'être enfouis.

## 2.2 Ajouts cimentaires normalisés et alternatifs

### 2.2.1 Revue générale

Bien que l'invention du ciment Portland par Joseph Aspdin date de 1824, l'utilisation de béton produit à l'aide de matériaux durcissants date d'environ 7000 ans av. J.-C. L'utilisation d'AC a quant à elle débuté à l'époque romaine, mais semble avoir été perdue durant le Moyen-âge. Ce n'est qu'au XIV<sup>e</sup> siècle que les recherches recommencèrent, notamment avec John Smeaton et la construction du phare d'Eddystone [Kosmatka *et al.*, 2003]. Depuis ce temps, les AC ont gagné en popularité et ils seront bientôt un incontournable pour produire des bétons plus écologiques.

La première norme CSA concernant le ciment hydraulique date de 1922, tandis qu'elle date de 1998 pour les AC. Les ACA jouissent cependant de leur première norme depuis 2008. Les principaux AC sont la fumée de silice (FS), les cendres volantes (CV), les pouzzolanes naturelles (N) et les laitiers (L). Les trois premiers sont considérés avant tout comme des

matériaux pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'ils utilisent la chaux hydratée produite par l'hydratation du ciment pour produire d'autres gels de silicates hydratés. Le laitier est cependant avant tout un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il est capable de réagir seul en présence d'eau pour durcir. En effet, il contient une quantité appréciable de CaO, tout comme le ciment Portland, ce qui lui permet de former lui-même des C-S-H. Dans tous les cas, il est possible que les AC possèdent à la fois des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques.

Afin d'appartenir à l'une ou l'autre des catégories d'AC, il est nécessaire de satisfaire certaines exigences, notamment au niveau de la composition chimique et de certaines propriétés physiques [CSA, 2008b]. Ces exigences chimiques et physiques sont résumées au Tableau 2.1 et au Tableau 2.2 respectivement. Les CV sont séparées en trois différentes classes, selon leur teneur en CaO. Avant 2008, seulement deux classes existaient; F et C. Maintenant, la classe C a été divisée en deux classes; CI et CH. De plus, une autre classe de FS contenant un peu moins de SiO<sub>2</sub> est maintenant acceptée. Elle est désignée sous le nom FS I.

**Tableau 2.1 : Exigences chimiques pour les ajouts cimentaires normalisés**

Propriétés	N	CV F	CV CI	CV CH	L	FS	FS I
CaO (%)	-	< 8	8-20	> 20	-	-	-
SO <sub>3</sub> (% max)	3	5	5	5	4	1	1
S (% max)	-	-	-	-	2,5	-	-
PAF (% max)	10	8	6	6	-	10	10
SiO <sub>2</sub> (% min)	-	-	-	-	-	85	75

**Tableau 2.2 : Exigences physiques pour les ajouts cimentaires normalisés**

Propriétés	N	CV F	CV CI	CV CH	L	FS	FS I
> 45 µm (% max)	34	34	34	34	20	10	10
Autoclave (% exp. max)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,2	0,2
Activité pouzzolanique min à 7 jours (% du témoin)	-	-	-	-	-	-	105
Activité pouzzolanique min à 28 jours (% du témoin)*	75	75	75	75	80	-	-
Tendance à entraîner de l'air	-	-	-	-	-	Pas de mousse visible	

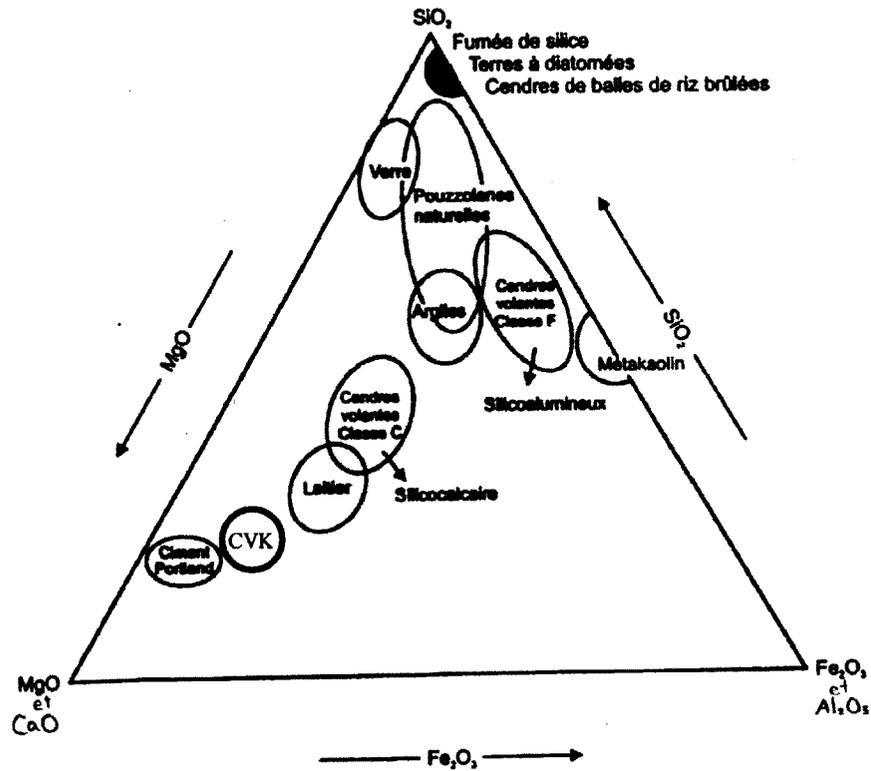
\*Cette exigence est optionnelle

D'autres exigences concernant les propriétés et performances des mortiers ou bétons mélangés avec des AC sont aussi à satisfaire et sont disponibles dans les normes.

Les CV proviennent des gaz de sortie des centrales thermiques qui pulvérisent le charbon, ou une combinaison de charbon et d'au maximum 30 % de coke de pétrole. Le laitier est un matériau vitreux formé lorsque le produit qui surnage au-dessus de la fonte dans les hauts fourneaux est refroidi rapidement. La FS est un sous-produit de la fabrication du silicium, du ferrosilicium ou d'autres alliages contenant du silicium, qui est récupéré dans les gaz d'échappement des fours. Dans tous les cas, ces sous-produits subissent un refroidissement très rapide afin d'emmagasiner de l'énergie pour ensuite pouvoir réagir dans le béton.

Il est possible que certains produits montrent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques intéressantes, mais ne satisfassent pas aux exigences de la norme CSA sur les matériaux cimentaires. Ces produits peuvent alors se tourner vers la norme CSA sur les ACA [CSA, 2008a]. Cette norme inclut un large éventail de matériaux pouvant contribuer aux performances à court et/ou à long terme des bétons. Par exemple, des laitiers qui proviendraient de la production de l'acier ou de matériaux non ferreux au lieu de la fonte pourraient être inclus. Des sous-produits de l'alliage de ferrosilicium au lieu de silice pur ou des FS contenant moins de 75 % de  $\text{SiO}_2$  pourraient aussi satisfaire cette norme. De la poudre de verre finement broyée ainsi que d'autres sous-produits contenant de la silice amorphe sont aussi susceptibles de satisfaire cette norme. Finalement, des cendres provenant de l'incinération ou de la co-combustion, au lieu de la pulvérisation du charbon, peuvent aussi satisfaire cette norme. C'est particulièrement ce dernier type de produit qui correspond aux cendres de la présente étude.

Le diagramme présenté à la Figure 2.2 illustre la classification des principaux AC selon leur composition chimique. Il est possible de constater que les CVK se retrouvent tout près du ciment et du laitier, ce qui signifie qu'elles ont une forte teneur en  $\text{CaO}$ , et pourrait donc démontrer des propriétés hydrauliques.



**Figure 2.2: Composition chimique des principaux ajouts cimentaires et de la CVK (adapté de Aïtcin, 2008)**

### 2.2.2 Cendres volantes normalisées

Les CVN proviennent des centrales thermiques au charbon. Lors de la combustion, les impuretés, ainsi qu'une petite partie de carbone contenu dans le charbon, ne peuvent être brûlées et se fusionnent pour former les CV. Elles sont ensuite refroidies très rapidement et se solidifient sous forme de petites sphères. La grosseur des particules se situe environ entre 1 et 100  $\mu\text{m}$ . La densité des CVN se situe en moyenne entre 2.2 et 2.8  $\text{Mg/m}^3$  et leur surface spécifique entre 400 et 700  $\text{m}^2/\text{kg}$  [Kosmatka *et al.*, 2003, ACI, 1996, et Tagnit-Hamou, 1995]. Selon leur provenance, les CVN produites seront différentes, tant au niveau physique que chimique [Carette et Malhotra, 1987].

Depuis 2008, les CVN sont séparées en trois grandes classes. Cependant, les cendres utilisées dans le cadre de ce projet proviennent des anciennes classes, soit la classe F (CVF) et la classe C (CVC). Leur composition typique est présentée dans le Tableau 2.3.

Les matériaux pouzzolaniques, comme les CV, sont réactifs, car ils sont amorphes, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de réseau cristallin ordonné. Ces phases amorphes ont donc tendance à vouloir réagir pour s'ordonner. De plus, ces matériaux ont emmagasiné une quantité importante de chaleur lors de leur refroidissement très rapide. Selon Joshi *et al.* (1986), la finesse semble le meilleur indicatif de la réactivité d'une CV. En effet, plus la finesse est grande, plus la quantité de surface pour réagir est grande. En général, les CVC ont de plus fines particules que la CVF, ce qui explique qu'elles soient plus réactives. De plus, elles ont généralement une quantité plus élevée de phases réactives.

**Tableau 2.3: Composition typique des différentes cendres volantes normalisées**

<b>Principaux éléments (%)</b>	<b>Gamme pour les CVF</b>	<b>Gamme pour les CVC</b>
SiO <sub>2</sub>	38 à 65	33 à 61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 à 33	8 à 26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 à 31	4 à 10
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 70	< 70
CaO	0,6 à 13,3	14 à 37 (> 10)
SO <sub>3</sub>	0 à 4	0,5 à 7,3
MgO	0 à 5	1 à 7
K <sub>2</sub> O	0,7 à 5,6	0,3 à 2
Na <sub>2</sub> O	0 à 3,1	0,4 à 6,4
<b>Perte au feu (PAF) (%)</b>	<b>0,1 à 12</b>	<b>0,2 à 1,4</b>

Selon Roy *et al.* (1986)

Les CVN ralentissent l'hydratation du béton. Tout d'abord, elles s'hydratent elles-mêmes plus lentement que le ciment, car leur réaction dépend de la quantité de CH produite par la réaction d'hydratation du ciment. De plus, seulement par leur présence, les CVN retardent l'hydratation de certaines phases du ciment [Grutzeck *et al.*, 1986 et Plowman *et al.*, 1981]. Bien qu'elles soient plus réactives, les mélanges avec CVC montrent une hydratation plus lente qu'avec les CVF [Roy *et al.*, 1986]. En effet, les CVC retarderaient davantage l'hydratation du ciment que la CVF.

L'hydratation du ciment étant une réaction exothermique, ce ralentissement dans l'hydratation fait en sorte de diminuer la quantité de chaleur dégagée. La quantité de chaleur dégagée par un mélange ne contenant que du ciment est presque 50 % plus élevée qu'un mélange contenant 40 % de CVN après 24 h [Fajun *et al.*, 1987]. Bien que les résultats soient différents selon le taux de remplacement et le type de CV, la tendance générale est que plus il y a de CVN en remplacement du ciment, plus la quantité de chaleur dégagée diminue.

Les CV consomment le CH produit par l'hydratation du ciment pour produire des C-S-H. Cependant, ces C-S-H ne sont pas exactement les mêmes que ceux formés par l'hydratation du ciment. En fait, les CVN apporteraient plus de S ( $\text{SiO}_2$ ) et plus d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [Roy *et al.*, 1986]. De plus, le C-S-H formé serait moins dense et fixerait plus d'alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) [Massazza, 1991 et Tagnit-Hamou, 1995]. Ceci permettrait aux CV de fournir une bonne protection contre certaines détériorations, notamment les réactions alcalis granulats (RAG).

Comme les CVN ralentissent en général les réactions, on peut s'attendre à ce que le gain de résistance soit plus lent lui aussi. En effet, le remplacement de ciment par une partie de CVN diminue les résistances mécaniques à jeune âge, mais augmente celles à long terme. Grâce à leur réaction pouzzolanique, les CVN améliorent aussi la perméabilité des bétons à long terme, puisqu'à la fin, il y a plus de C-S-H formés et moins de CH résiduels. De plus, grâce à sa petite taille et à sa forme sphérique, les CVN densifient la pâte, diminuant ainsi la porosité [Baker *et al.*, 1986].

Les CVN augmentent généralement l'affaissement des bétons grâce à leur forme sphérique, qui a l'effet d'un roulement à billes, et grâce à leur bonne compacité et leur effet de remplissage, qui permettent de libérer un maximum d'eau piégé à l'intérieur des vides [Tagnit-Hamou, 1995]. Tous ces facteurs permettent au béton de s'écouler plus facilement.

En plus de diminuer la demande en eau et de s'hydrater à plus long terme, les CVN montrent des résultats satisfaisants à la résistance aux cycles de gel/dégel et au retrait de séchage et du fluage égal ou inférieur au témoin [Carette et Malhotra, 1987].

Cependant, lorsqu'un SP est utilisé, il peut y avoir certains problèmes, car les CVN adsorbent le produit [Khayat *et al.*, 2008]. De plus, le carbone non brûlé présent dans les CVN aurait tendance à adsorber l'agent entraîneur d'air, ce qui peut diminuer son efficacité. Cet air y est entraîné afin de permettre au béton de mieux résister aux cycles de gel/dégel [Freeman *et al.*, 1997].

Il y a donc une optimisation à faire afin de rendre l'utilisation des CVN la plus bénéfique possible.

### **2.2.3 Cendres volantes alternatives**

Il existe plusieurs autres sources que le charbon et plusieurs autres modes de combustion que la pulvérisation pouvant produire des CV. Par exemple, les boues de désencrage provenant des usines de pâtes et papiers, les boues des eaux usées, les déchets municipaux, les déchets des matériaux de construction, des pneus, les déchets des industries du bois et même de la tourbe peuvent constituer un sous-produit intéressant s'ils sont brûlés et refroidis à des températures adéquates.

Depuis 2008, la norme CSA sur les matériaux cimentaires a inclus une partie sur les ACA [CSA, 2008a]. Cette norme sert, à titre de guide, à donner quelques directives sur les performances recherchées. Elle donne entre autres la définition d'un ACA comme étant « un constituant inorganique qui montre des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques et qui contribue à la résistance et aux autres caractéristiques du béton ». La norme prévoit des spécifications quant aux résistances mécaniques à obtenir par rapport à un témoin ainsi qu'aux performances à avoir au niveau de la durabilité, des réactions alcalis-silice, de la résistance aux sulfates et de la teneur maximale en  $SO_3$ . Parmi les produits inclus dans cette nouvelle norme se retrouvent les cendres de l'incinération et de co-combustion. Ces dernières correspondent aux cendres étudiées dans ce projet.

### **2.2.4 Influence du mode de combustion**

Parmi les différentes méthodes de combustion existe la combustion par pulvérisation, qui est la plus utilisée actuellement pour brûler le charbon et qui génère la CVN. Elle fonctionne à des températures entre 1200 et 1400 °C [Anthony *et al.*, 2002]. La combustion par couche est la méthode la plus ancienne et fonctionne à environ 1100 °C. La méthode utilisée dans le cadre de ce projet est la combustion sur lit fluidisé.

La combustion sur lit fluidisé, ou « fluidized bed combustion (FBC) », consiste à rendre un mélange de particules solides et d'air homogène afin qu'il se comporte comme un fluide. Un jet d'air propulse les particules solides vers le haut et fait en sorte que les particules restent en suspension. Les réactions chimiques et le transfert de chaleur peuvent alors se faire de façon plus efficace. Un lit de sable est présent et permet un transfert de chaleur vers le combustible.

De la dolomie ou du carbonate de calcium (limestone), appelé sorbant, est aussi normalement ajouté avec le combustible.

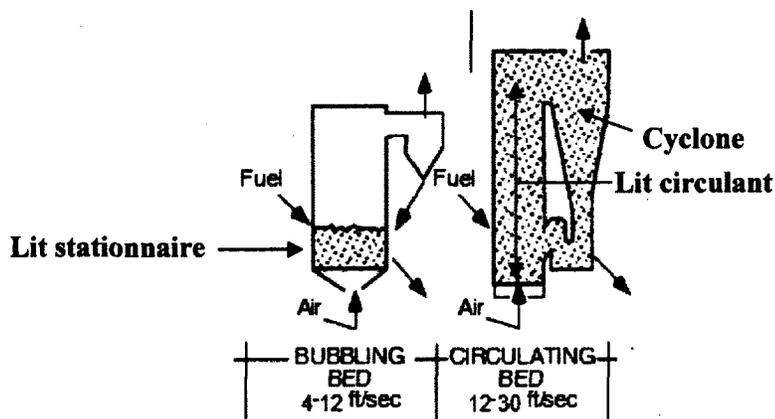
Les avantages à utiliser ce mode de combustion sont nombreux. Il s'agit d'un processus flexible, c'est-à-dire que les usines l'utilisant ne sont pas restreintes par une seule source de combustible. Elles peuvent par exemple utiliser le charbon et la biomasse. Le four accepte aussi des combustibles plus humides et sa température se contrôle plus facilement. De plus, le sorbant a la propriété de capter jusqu'à 90 % du soufre [Li *et al.*, 2006] et de les transformer en sulfates alcalins [Behr-Andres *et al.*, 1994] et en sulfates de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) [Li *et al.*, 2006, Anthony *et al.*, 2003], ce qui diminue les émissions de  $\text{SO}_x$ .

Comme la technique est efficace au point de vue des réactions chimiques et du transfert de chaleur, la combustion se fait à des températures inférieures aux autres méthodes, soit à environ 850 °C, ce qui réduit aussi les émissions de  $\text{NO}_x$ . De l'érosion à l'intérieur de la chaudière et des températures inégales peuvent cependant survenir à cause des entrées d'air sous le lit. Le démarrage peut aussi être plus lent.

Il existe 2 différents types de FBC. Le premier se nomme « Bubbling bed », lit fluidisé bouillonnant (BFBD), et utilise un lit stationnaire. L'air entraîné forme de grosses bulles dans le lit. Ces bulles montent grâce à la poussée d'Archimède, créant ainsi le mouvement fluide [Lavta-Somppi *et al.*, 1998c]. La vitesse à l'intérieur d'un BFBC est d'environ 1 m/s [Lavta-Somppi, 1998a]. Elle est gardée sous la vitesse d'entraînement afin de garder le lit stationnaire.

Le second type est nommé « Circulating bed », ou lit circulant (CFBC). Il requiert plus d'énergie cinétique et son lit est suspendu. La vitesse à l'intérieur d'un CFBC est d'environ 3 à 5 m/s [Lavta-Somppi, 1998a]. Comme une bonne partie du lit est propulsé vers le haut, un cyclone est présent pour séparer les petites des grosses particules afin de renvoyer les plus grosses dans le four.

Enfin, les 2 types peuvent fonctionner à pression atmosphérique ou à haute pression, ce qui donne une gamme de quatre possibilités. Le type à haute pression permet de faire tourner une turbine à vapeur et ainsi créer un cycle combiné efficace. Le fonctionnement des deux types de FBC est illustré à la Figure 2.3.



**Figure 2.3: Combustion sur lit fluidisé (adapté de Miller et Tillman, 2008)**

Selon les recherches de Lavta-Somppi *et al.* (1998b), la température du BFBC varie entre 800 et 850 °C, tandis que le CFBC fonctionne à une température autour de 765 °C, car il est plus efficace. Le temps de résidence des CV à l'intérieur de la chambre de combustion des CFBC n'est que de quelques secondes (correspondant au temps nécessaire à la masse pour aller du four jusqu'au cyclone à une vitesse d'environ 3 à 5 m/s) tandis que celui des BFBC est beaucoup plus long, du à la vitesse de circulation plus faible dans le four (environ 1 m/s).

Selon d'autres études de Lavta-Somppi *et al.* (1998a et 1998c), la principale différence entre les deux modes de fonctionnement est que les réactions de transformations vont plus loin dans les BFBC, c'est-à-dire que la structure cristalline des phases minérales subit plus de transformations. Ceci serait dû à la température de combustion plus élevée dans les BFBC, ainsi qu'au temps de résidence plus long à l'intérieur du four. Cela a aussi pour effet d'avoir une plus faible perte au feu (PAF) pour les CV provenant de BFBC et la fixation du soufre avec le sorbant est meilleure [Gaglia *et al.*, 1987].

Il est à souligner que la combustion de la biomasse à l'usine Kruger se fait sur un lit fluidisé stationnaire (BFBC) à haute pression. La pression d'opération est de 8,6 MPa. La capacité de recirculation des gaz est de 109 091 kg/h [Kruger, 2004].

Différents types de cendres sont formés dans un FBC [Lavta-Somppi, 1998a];

- 1- « Bottom ash » : ce sont les plus grosses particules qui restent dans le lit par ségrégation ainsi que les particules qui se déposent sur le lit. En effet, certaines particules sont attirées par des forces de surfaces sur les particules de sable du lit.

- 2- « Fly ash » (CV) : particules qui sont entraînées vers le haut et qui passent par le cyclone avec les gaz d'évacuation. Ce sont les particules plus fines, comme celles formées par condensation. Ce sont ces particules qui font l'objet de la présente étude.
- 3- Résidus sur les murs du four et les échangeurs de chaleur : accumulés par dépôt, par condensation de vapeur ou par réaction chimique.

Que ce soit d'un BFBC ou d'un CFBC, les CV produites à partir d'un FBC contiendront les impuretés non brûlées du combustible, comme toutes les autres CV, mais aussi une partie du sorbant [Behr-Andres *et al.*, 1994]. Ce dernier sera soit formé à base de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), soit à base de dolomie ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Selon Li *et al.* (2006), et Anthony *et al.* (2003), les réactions des équations 2.1 et 2.2 se produisent, dans le cas d'un sorbant à base de calcite :

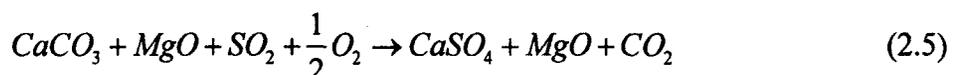
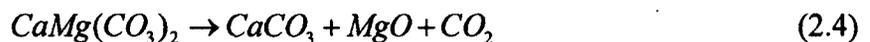


Lors de la combustion, le sorbant est d'abord réduit en CaO pour ensuite réagir avec le soufre et former du gypse anhydre. Le CaO non utilisé se retrouvera à l'intérieur des CV, ce qui leur donnera des propriétés uniques. En effet, ces CV auront des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'elles pourront réagir en présence d'eau, sans nécessairement avoir besoin de la chaux hydratée (CH) produite par le ciment [Behr-Andres *et al.*, 1994, Anthony *et al.*, 2003].

Cependant, lorsque le FBC fonctionne à haute pression (PFBC), il n'y aurait pas de réduction du carbonate de calcium en chaux libre. Selon Maenami *et al.* (2004), et Anthony *et al.* (1997), le sorbant (dans ce cas-ci à base de calcite) réagirait directement avec le  $\text{SO}_2$  pour former du gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) et du  $\text{CO}_2$  (voir équation 2.3) :



Si le sorbant est plutôt à base de dolomie, les réactions des équations 2.4 et 2.5 ont lieu [Anthony *et al.*, 1997];



Avec ce type de sorbant, il y a du MgO résiduel pouvant se retrouver à l'intérieur des CV. Cela fait en sorte d'augmenter la réactivité des CV en jouant un peu le même rôle que le CaO.

Les CV provenant de FBC à haute pression auront donc des propriétés différentes que celles produites à pression atmosphérique. Elles contiendraient plus de CaCO<sub>3</sub> et de CaSO<sub>4</sub> à cause du sorbant ajouté dans le lit (et plus de MgO dans le cas de la dolomie), mais il y aurait moins de calcium sous forme de CaO [Maenami *et al.*, 2004, Anthony *et al.*, 1997]. Les CV des PFBC auraient une plus grande PAF, du à la grande quantité de carbonate présente et non à cause du carbone non brûlé.

En général, les CV provenant de FBC contiennent une quantité élevée de gypse sous forme anhydre. Ce gypse pourrait causer des problèmes du à la formation d'ettringite [Jahn *et al.*, 1990, Anthony *et al.*, 2002 et Ayrinhac, 2008]. Des CV provenant de charbon noir brûlé dans un FBC ont été étudiées. Elles contiennent beaucoup de carbonate de calcium et de sulfate de calcium. Il a été démontré que les bétons contenant 20 et 40 % de ces CV formaient de l'ettringite retardé [Rajczyk *et al.*, 2004]. Dans le cas des CVK, il n'y a pas de sorbant ajouté avec le combustible, puisque ce dernier n'est pas particulièrement riche en soufre. Il n'y aurait donc pas ou peu de sulfate de calcium.

Finalement, comme ces CV proviennent d'une chaudière chauffant entre environ 800 et 1000 °C, soit plus bas que les autres méthodes de combustion, elles ont une plus grande PAF [Kamon *et al.*, 1995]. De plus, la CV produite est plus irrégulière, plus rugueuse et plus grossière [Li *et al.*, 2006, Maenami *et al.*, 2004, Kamon *et al.*, 1995, Lavta-Somppi *et al.*, 1998b, Anthony *et al.*, 2003]. L'amélioration de la maniabilité des bétons est donc plus difficile qu'avec une CVN [Kamon *et al.*, 1995].

En effet, ce sont les minéraux présents qui s'agglomèrent pour former les CV. Au départ, les CV sont grosses et poreuses, mais elles sont réduites par fragmentation lorsqu'elles se cognent entre elles. Le diamètre des CV formées est généralement supérieur à 10 µm et varie entre 10 et 100 µm. Le diamètre des CV formées dans un CFBC sera plus petit, puisque la vitesse à l'intérieur du four est plus grande et la collision entre les particules est plus importante. En plus d'être plus grosses, les CV provenant d'un FBC sont frittées, c'est-à-dire sous forme de

feuillet [Lavta-Somppi *et al.*, 1998b, Jahn *et al.*, 1990]. Elles auraient plus de phases cristallines et moins de particules sphériques qu'une CVN [Maenami *et al.*, 2004].

## **2.3 CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers**

La composition de la CVA sera fonction des différentes matières premières qui serviront de combustible. Dans le cas de l'industrie des pâtes et papiers, le type et la qualité du papier recyclé auront un impact sur la composition des cendres. De plus, les différentes proportions de boues de désencrage, de boues primaires et secondaires ou de résidus de bois aura forcément un impact sur sa composition. Les différentes phases présentes dans la CVA seront plutôt fonction de la température et du temps de résidence dans la chaudière [Kinuthia *et al.*, 2001].

Dans le cas de l'usine Kruger, le combustible est composé de : boues primaires et secondaires du traitement des eaux usées, boues de désencrage, écorces et résidus de bois (sciures, planures, résidus de sablage, panneaux de particules, panneaux de contre-plaqué, palettes de bois, résidus industriels et résidus de bois de l'industrie de la construction et de la démolition) [Kruger, 2003 et 2005c].

Les boues constituent environ 40 % du combustible et sont utilisées en priorités par rapport aux autres sources de combustible, afin d'éviter les odeurs pouvant émaner de son entreposage. Les boues de désencrage sont obtenues lorsque l'encre du papier recyclé doit être retirée. Elles sont composées de fibre de papier, d'argile et d'autres solides, qui représente seulement un faible potentiel de toxicité [Sivasundaram, 2000].

Les écorces et résidus de bois constituent environ 57,5 % du combustible. De la boue seule requiert trop de chaleur pour brûler. C'est pourquoi des écorces et des résidus de bois sont ajoutés [Lavta-Somppi *et al.*, 1998b et Sivasundaram, 2000]. En effet, ces derniers auraient un grand pouvoir calorifique. De plus, ils ne contiennent pas de polluants.

Environ 2 % du combustible provient du mazout et du gaz naturel, requis lors des démarrages de la chaudière.

Finalement, 0,5 % du combustible est composé des huiles usées de l'usine [Kruger, 2005c].

La combustion de cette biomasse permet de réduire le volume à enfouir d'environ 40 à 50 % [Kinuthia *et al.*, 2001 ou Pera et Amrouz, 1998]. Chez Kruger, la teneur moyenne en matière inorganique est d'environ 5 % pour le bois, 15 % pour les boues primaires et secondaires et 40 % pour les boues de désencrage. La partie organique, constituée de fibres cellulosiques résiduelles, sera récupérée en énergie lors de la combustion. Il reste donc la partie inorganique, composée principalement de calcaire, de talc et de kaolin, qui sera récupérée sous forme de CV.

Les oxydes majeurs des CVA sont donc le  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaO}$ , provenant probablement de la kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) et des minéraux de calcite de la boue ( $\text{CaCO}_3$ ). Le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et le  $\text{TiO}_2$  proviennent de l'encre des boues de désencrage. Les écorces et les résidus de bois sont la source majeure du  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et une source mineure pour le  $\text{SiO}_2$  et  $\text{CaO}$ . Le  $\text{MgO}$  et  $\text{TiO}_2$  proviennent principalement d'un produit utilisé pour éclaircir le papier; le talc ( $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Le  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  agiraient comme agent de nucléation pour la cristallisation [Sivasundaram, 2000 et Lavta-Somppi *et al.*, 1998c].

Les CV provenant de l'industrie des pâtes et papiers sont d'une couleur blanchâtre/jaunâtre à grise avec quelques particules charbonneuses noires.

## **2.4 Effets sur les systèmes cimentaires**

Une pouzzolane est un matériau siliceux ou aluminosiliceux qui a lui seul n'a pas de propriété liante, mais qui en la présence d'eau réagit avec le CH pour produire des hydrates possédant les propriétés du ciment. Un matériau hydraulique, comme le ciment hydraulique, est un type de ciment qui prend et durci avec l'eau et qui est capable de prendre et de durcir sous l'eau. La CVA de la présente étude pourrait avoir des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques. Dans les deux cas, elle affectera les performances des pâtes, mortiers ou bétons dans lesquels elle remplace une partie du ciment, puisqu'elle est différente du ciment conventionnel.

Cette section devrait permettre de prédire les comportements de la CVK à partir des études déjà réalisées avec d'autres CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers.

## 2.4.1 Caractérisation

Tout d'abord, le traitement thermique des boues joue un rôle important sur les caractéristiques des CVA. Idéalement, il doit être contrôlé de façon à détruire complètement la matière organique des boues et de minimiser la décarbonatation de la calcite, qui se produirait à environ 725°C [Sanders et Gallagher, 2002] et qui réduit le pouvoir pouzzolanique des cendres [Elayadi, 2006, Pera et Amrouz, 2008]. De plus, il est nécessaire d'assurer la transformation de la kaolinite en métakaolinite. Cette dernière transformation est possible entre 500 et 900°C, mais la transformation la plus optimale serait entre 700 et 850°C [Elayadi, 2006]. En dessous de 700°C, la métakaolinite formée est moins réactive et il y a plus de kaolinite résiduelle, tandis qu'au-dessus de 850°C, la métakaolinite se cristallise et devient moins réactive.

Une revue de la composition chimique des CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers est présentée au Tableau 2.4. En comparaison avec les CVK, la plus grande différence est qu'il y a moins de SiO<sub>2</sub> et plus de CaO et de PAF dans les CVK. Cette différence pourrait être attribuable à la composition du combustible ainsi qu'aux conditions de combustion. Néanmoins, les CVA provenant du Royaume-Uni et de l'Espagne sont celles ayant les compositions les plus proches des CVK. Les différences les plus importantes sont que les CVK ont moins d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et plus de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les compositions chimiques des CVK seront présentées au chapitre 3, dans le Tableau 3.8. Il est possible de constater que la CVK 1 ressemble particulièrement aux CVA du Royaume-Uni. La CVK 3 ressemble aussi beaucoup à la CVA utilisée par Banfill et Frias (2007), Vigil de la Villa *et al.* (2007), Vegas *et al.* (2009b) et Rodriguez *et al.* (2008), tous de l'Espagne. Finalement, la première CVK utilisée dans le cadre du projet [Xie, 2009], est aussi présentée dans ce tableau. Cette cendre a été produite en 2007.

**Tableau 2.4: Composition chimique de différentes CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers**

Provenance	Canada		Corée	Finlande		Royaume-Uni			France	Espagne	
Références	Xie, 2009	Sivasundaram, 2000	Soh et al., 1995	Lavta-Somppi et al., 1998b	1998c	Bai et al., 2003, Mozaffari et al., 2009	O'Farrell et al., 2002	Kinuthia et al., 2001	Elayadi, 2006	Frias et al., 2008a)b), Vegas et al., 2009a)	Banfill et Frias, 2007, Vigil de la Villa et al., 2007, Rodriguez et al., 2008, Vegas et al., 2009b)
Matières premières	Boues	Boues et écorce	Boues	Boues et écorce	Boues et bois	Boues et fibres	Boues	Boues (juin 99)	Boues	Boues	Boues
Mode de combustion	BFBC	FBC	Incinéré	BFBC	CFBC	FBC	FBC	FBC	Incinéré	Incinéré (650°C)	Incinéré (700°C)
SiO <sub>2</sub>											
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,6	21,0	29,8	17,8	15,2	18,9	18,7	18,4	19,4	13,6	18,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0	3,0	1,6	1,6	3,4	0,9	0,9	1,8	1,5	0,5	0,7
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46,4	74,0	81,4	57,7	52,8	45,4	43,8	44,3	-	-	48,9
CaO											
MgO	2,3	2,0	5,4	4,4	4,1	5,2	5,2	5,0	5,8	2,2	3,7
SO <sub>3</sub>	1,9	-	-	-	0,9	1,1	1,1	1,1	-	0,3	0,3
K <sub>2</sub> O	1,1	2,0	0,7	1,7	1,3	1,3	-	-	0,8	0,4	0,3
Na <sub>2</sub> O	0,7	1,5	2,0	0,5	0,8	1,6	-	-	0,4	0,1	0,2
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> *	1,4	2,8	2,5	1,6	1,7	2,4	-	-	0,9	0,5	0,4
TiO <sub>2</sub>	1,0	3,0	2,3	0,7	1,0	0,7	-	-	0,6	0,3	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,1	1,0	0,9	0,8	2,2	0,5	-	-	0,4	0,2	0,2
MnO	0,1	0,5	0,5	0,3	0,1	0,0	-	-	0,0	-	-
Cl	0,5	-	-	0,1	0,3	-	-	-	-	-	-
PAF	5,1	-	1,9	-	-	1,2	-	-	1,8	23,4	14,5

\*Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> = Na<sub>2</sub>O + 0,658·K<sub>2</sub>O

Une série de cinq publications provient de l'Université de Glamorgan au Royaume-Uni. Les auteurs ont étudié certains effets de CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers à l'intérieur de systèmes cimentaires. Les matières sont brûlées dans un FBC et résident entre 3 et 5 secondes à l'intérieur de la zone de combustion à des températures variant entre 850 et 1200 °C. Elles sont ensuite refroidies rapidement à 200 °C durant 3 à 5 secondes. Leurs CVA sont composées des phases cristallines suivantes; quartz (provenant principalement du sable du lit fluidisé), gehlénite, anorthite, carbonate de calcium, chaux libre, traces de chaux hydratée, brédigite et  $\alpha$ 'C<sub>2</sub>S(stabilisé avec Al et Mg). De plus, elles contiennent beaucoup d'alumine et de silice sous forme amorphe, qui forment des phases d'aluminosilicate de calcium avec différentes proportions de Al et de Si, qui sont des composés pouzzolaniques. L'alumine et la silice amorphes forment aussi des phases de silicate/aluminate/aluminosilicate de calcium, qui sont des composés hydrauliques. Les cendres ont un pH élevé probablement à cause de la chaux libre. Elles ont une surface spécifique de 410 m<sup>2</sup>/kg et une densité de 2,52 [Kinuthia *et al.*, 2001, Bai *et al.*, 2003 et Mozaffari *et al.*, 2009].

Une autre série de publications provient de l'Espagne. Les auteurs ont testé des CVA provenant de la boue de papier calciné. En général, ils ont étudié plusieurs températures de calcination entre 600 et 800°C à des temps de résidence de 2 et 5 h. Ils broient et tamisent les CVA pour ne garder que les particules inférieures à 45 µm [Banfill et Frias, 2007, Vigil de la Villa *et al.*, 2007, Frias *et al.*, 2008a et b, Garcia *et al.*, 2008, Rodriguez *et al.*, 2008 et Vegas *et al.*, 2009a et b].

Une dernière série de publication provient de la France. Les auteurs ont étudié des boues de papeterie calcinées entre 700 et 800 degrés durant 2, 5 et 21 h. Après refroidissement, la cendre est broyée pour garder seulement des particules inférieures à 100 µm [Pera et Amrouz, 1998].

Les publications provenant de l'Espagne et de la France se sont particulièrement intéressées à l'effet de la température et du temps de résidence. En effet, d'autres ont aussi trouvé que le contrôle de la température est un facteur important pour obtenir un produit de qualité [Bierman *et al.*, 1997].

## 2.4.2 Propriétés à l'état frais

Les études démontrent que les CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers consomment plus d'eau ou de SP qu'une pâte, mortier ou béton témoin [Bisogni *et al.*, 1990, Pera et Ambroise, 1999, Kinuthia *et al.*, 2001, Chaipanich *et al.*, 2005, Vegas *et al.*, 2009b et Xie, 2009]. La même chose se produit avec des cendres provenant de l'incinération des boues des eaux usées [Paya *et al.*, 2002]. Dans le cas de la CVK de Xie, 2009, la demande en eau d'une pâte contenant 40 % de remplacement du ciment par la CVK augmente de 29 % par rapport au témoin. Dans le cas de mortier, la demande augmente de 8 et 12 % par rapport au témoin pour des remplacements de 20 et 40 % respectivement. De plus, une plus grande perte d'affaissement a lieu dans les mélanges avec CVK.

Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cette hausse de la demande en eau. La chaux libre (CaO) présente dans les CVA s'hydrate rapidement et pourrait expliquer en partie cette perte de maniabilité [Chaipanich *et al.*, 2005]. La grande finesse des CVA contribue aussi à augmenter la demande en eau, puisqu'il y a plus de surface à mouiller et il y a plus d'attraction entre les particules [Vegas *et al.*, 2009b].

Pour pallier aux effets de manque d'ouvrabilité avec les CVA, Soh *et al.*, (1995) ont introduit un polymère au latex, qui aide à minimiser la perte d'étalement, sans toutefois l'éliminer complètement.

## 2.4.3 Résistances à la compression

Les résultats de résistances à la compression montrent que les CVA ont certaines propriétés pouzzolaniques, mais aussi hydrauliques [Pera et Amrouz, 1998, Kinuthia *et al.*, 2001, Bai *et al.*, 2003 et Chaipanich *et al.*, 2005]. De plus, une augmentation de la quantité de C-S-H visible par DRX lorsque la quantité de CVA augmente montre la présence d'hydratation. L'absence de chaux libre dans la cendre après hydratation montre aussi que ce sont les composantes de la cendre elle-même qui s'hydratent plutôt qu'une réaction pouzzolanique [Kinuthia, 2001]. Cependant, à elles seules, elles ont une faible résistance, car elles sont très poreuses du à la transformation du CaO en CH, produit plus volumineux [Bai *et al.*, 2003 et

Chaipanich *et al.*, 2005]. À 28 jours, un mélange avec 100 % de CVA obtient 4 MPa comparativement à 61 MPa pour un témoin avec 100 % de ciment Portland [Bai *et al.*, 2003].

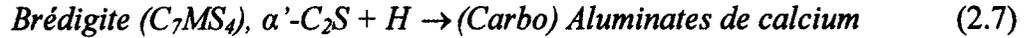
Plusieurs auteurs ont testé les CVA en remplacement du ciment et ont obtenu des résistances comparables ou meilleures qu'un témoin. Par exemple, 20 % de CVA obtient environ 114 % d'un témoin à 90 jours [O'Farrell *et al.*, 2002]. Dans un autre cas, 25 % de CVA surpasse le témoin à 28 jours, mais est un peu sous le témoin à 90 jours [Elayadi, 2006]. Une CVA aurait même une activité supérieure au métakaolin, qui serait expliqué par la présence d'un défaut superficiel qui serait produit lors de la calcination [Pera et Amrouz, 1998]. Des remplacements de 10 % et 15 % par cette CVA à l'intérieur de bétons n'affectent pas les résistances par rapport au témoin [Pera et Ambroise, 1999]. D'autres essais montrent qu'un béton avec 20% de remplacement du ciment obtient 10% d'augmentation des résistances à 28 jours, une réduction de la porosité totale et une baisse significative de 30% du diamètre moyen des pores [Pera et Ambroise, 2000]. Vegas *et al.* (2009b) obtiennent aussi des résultats comparables ou supérieurs au témoin. Il faut cependant noter que, dans la majorité des cas, le témoin n'avait pas de SP tandis que les mélanges avec CVA en avaient, ce qui les a peut-être avantagés. Finalement, la première CVK testée par Xie, 2009, montre des résultats équivalents au témoin pour des remplacements de 10 et 20 % du ciment. Les résultats sont inférieurs au témoin pour des remplacements de 30 et 40 %. Le remplacement optimal serait de 20 %. Cependant, les travaux de Mme Xie démontrent que les résultats ne sont pas aussi bons avec tous les types de SP.

L'apport des CVA aux résistances semble plus à court terme (1 à 28 jours) dans certains cas [Kinuthia *et al.*, 2001, Bai *et al.*, 2003 et Elayadi, 2006, Garcia *et al.*, 2008, Frias *et al.*, 2008b et Vegas *et al.*, 2009b] et plutôt à long terme (après 28 jours) dans d'autres cas [O'Farrell *et al.*, 2002 et Xie, 2009]. Cependant, pour la majorité, l'effet se fait ressentir à plus court terme.

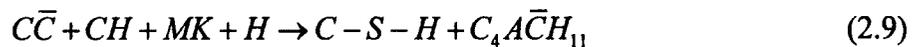
L'hydratation de la CVA génère différents produits d'hydratation. Tous s'entendent pour dire qu'il semble y avoir la formation de chaux hydratée (CH), selon l'équation 2.6 [Pera et Amrouz, 1998, O'Farrell *et al.* 2002 et Mozaffari *et al.*, 2009].



Selon certains auteurs, il y aurait ensuite l'hydratation du  $\alpha'$ -C<sub>2</sub>S ou de la brédigite [Mozaffari *et al.*, 2009] pour former des aluminates de calcium et/ou des carboaluminates de calcium selon l'équation 2.7.



Selon certains auteurs, le métakaolin (MK) présent dans la CVA réagirait pour former des carboaluminates de calcium et/ou des C-S-H selon les équations 2.8 [O'Farrell *et al.* 2002] ou 2.9 [Pera et Amrouz, 1998 et Pera et Ambroise, 1999]. Sans toutefois donner d'équation, Vegas *et al.* (2009b) ont aussi trouvé que la présence de métakaolin serait responsable de la formation de plus de gel de C-S-H.



Dans le même ordre d'idée que Pera et Amrouz (1998) et Pera et Ambroise (1999), Vegas *et al.* (2009b) a aussi noté une réaction avec le carbonate de calcium qui formerait des carboaluminates, tel que présenté à l'équation 2.10;



Les principaux produits d'hydratation des mélanges avec la CVA sont donc;

- CH et gels de C-S-H [Pera et Amrouz, 1998, Kinuthia *et al.*, 2001, Bai *et al.*, 2003, Chaipanich *et al.*, 2005];
- aluminates de calcium (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>) [Bai *et al.*, 2003, Chaipanich *et al.*, 2005];
- et/ou des carboaluminates de calcium (C<sub>4</sub>A<sub>0,5</sub>C̄H<sub>12</sub> [Bai *et al.*, 2003, Chaipanich *et al.*, 2005], C<sub>4</sub>A<sub>1</sub>C̄H<sub>11</sub> [Pera et Amrouz, 1998]).

De l'ettringite a aussi été observé, ainsi que des hydrates de gehlénite et d'hydrogarnet [Kinuthia *et al.*, 2001]. La formation de monocarboaluminate de calcium expliquerait en partie le fait que la CVA obtient de meilleures résistances que le métakaolin conventionnel, qui lui n'en produit pas [Pera et Amrouz, 1998].

Mis à part les produits d'hydratation formés, qui peuvent aider au gain de résistance, d'autres facteurs peuvent aussi expliquer pourquoi les mélanges avec CVA obtiennent des résistances égales ou supérieures au témoin. En effet, la grande finesse de la CVA réduirait la taille des pores. De plus, elle agirait comme filler et fournirait plus de sites de nucléation, ce qui faciliterait l'hydratation du ciment [Frias *et al.*, 2008b et Vegas *et al.*, 2009b].

Il est aussi important de mentionner que l'hydratation de la chaux libre (C ou CaO) forme la chaux hydratée (CH ou Ca(OH)<sub>2</sub>). Ce dernier est plus volumineux. Il est donc important que l'hydratation du CaO se produise avant la fin de la prise, sans quoi il y aura un risque d'expansion et augmentation de la porosité [Chaipanich *et al.*, 2005].

Certaines combinaisons ont été faites avec la CVA et du laitier et montrent des résultats intéressants. Par exemple, une pâte sans ciment contenant 50 % de laitier et 50 % de CVA obtient de basses résistances à jeune âge, mais atteint entre environ 34 et 50 % des résistances d'une pâte contenant 100 % de ciment Portland à 28 jours, selon le rapport E/C utilisé [Kinuthia *et al.*, 2001 et Bai *et al.*, 2003]. Les résultats de résistances à la compression montrent aussi que les cendres contribuent à activer le laitier [Kinuthia *et al.*, 2001]. En effet, l'hydratation du ciment Portland laisse du CH en excès et libère des alcalis, ce qui maintient le pH de la solution élevé et permet au laitier de se dissoudre et de s'hydrater. Comme la CVA contient de la chaux libre, qui se transforme rapidement en CH, cela a le même effet pour activer le laitier [Mozaffari *et al.*, 2009]. De plus, cette alcalinité activerait aussi les phases vitreuses d'aluminosilicate de la CVA elle-même, un peu comme celle du laitier. Elle permettrait en effet de relâcher la silice « hydratante » de la cendre, ce qui aiderait à former d'autres gels de C-S-H. À elle seule cependant, la CVA ne peut être assez résistante, en partie à cause de sa grande porosité et car elle contient une proportion significative de composés non hydrauliques (incluant la gehlénite), mais aussi possiblement car certains de ses composés hydrauliques sont inaccessibles par l'eau [Mozaffari *et al.*, 2009]. Lorsqu'utilisée en remplacement du ciment, plus la teneur en cendre est élevée, plus le pH du mélange sera bas, ce qui ralentit la vitesse d'hydratation des cendres et l'activation du laitier [O'Farrell *et al.*, 2002]. Lorsqu'elle est utilisée seule, la CVA obtient de faibles résistances du à sa grande porosité. Le laitier viendrait affiner ces pores et donc aider aux résistances [Chaipanich *et al.*,

2005]. O'Farrell *et al.* (2002) ont aussi trouvé que le laitier augmente les résistances d'un mélange avec CVA.

Certains auteurs ont mis en évidence l'importance de la température de combustion et le temps de résidence des CVA sur leur activité pouzzolanique. Des températures variant entre 600°C et 800°C ainsi que des temps de résidence de 2 et 5 h ont été testés. L'optimum au niveau de l'activité pouzzolanique se situe entre 650-750°C durant 2 h [Pera et Amrouz, 1998, Pera et Ambroise, 1999, Pera et Ambroise, 2000, Elayadi, 2006, Vigil de la Villa *et al.*, 2007, Frias *et al.*, 2008a et Garcia *et al.*, 2008,]. Avec les paramètres optimaux de production, la CVA produite est comparable au métakaolin commercialisé [Vigil de la Villa *et al.*, 2007] et même meilleure [Pera et Amrouz, 1998]. À de plus faibles températures, il y a encore la présence de fibres cellulosiques, qui réduisent la réactivité de la CVA [Pera et Amrouz, 1998, Pera et Ambroise, 1999, Frias *et al.*, 2008a et Garcia *et al.*, 2008]. À de plus hautes températures et à plus long temps de résidence, les résistances sont moins bonnes, car il y a décarbonatation, production de nouvelles phases minérales et moins de surfaces réactives du à la production de particules plus grosses et la production de nouvelles phases cristallines [Pera et Amrouz, 1998, Pera et Ambroise, 1999, Elayadi, 2006, Vigil de la Villa *et al.*, 2007 et Garcia *et al.*, 2008,]. Par exemple, à 800°C, l'activité est faible notamment à cause de la formation de gehlénite [Pera et Amrouz, 1998 et Elayadi, 2006].

Finalement, il est intéressant de noter qu'une CVA obtenue par « wet-milling », ou par voie humide, obtient environ 20 % de plus de résistances à la compression qu'une CVA obtenue par voie sèche [Mozaffari *et al.*, 2009]. Dans ce cas-ci, l'eau permet aux CVA de se désagglomérer et de former le CH avant la prise, ce qui limite le gonflement.

#### **2.4.4 Temps de prise**

En général, les AC pouzzolaniques utilisent le produit formé par l'hydratation du C<sub>2</sub>S et du C<sub>3</sub>S du ciment, soit le CH, pour s'hydrater et former d'autres produits d'hydratation. Comme cette deuxième réaction dépend de la première et que de plus, elle est plus lente, la substitution d'une partie du ciment par des AC ralentit les réactions, donc la prise. Cependant, dans le cas des CVA étudiées, il se produit l'effet contraire.

Plusieurs études montrent en effet que l'utilisation des CVA en remplacement du ciment diminue le temps de prise [Kinuthia *et al.*, 2001, O'Farrell *et al.*, 2002, Bai *et al.*, 2003, Chaipanich *et al.*, 2005, Garcia *et al.*, 2008, Frias *et al.*, 2008b, Vegas *et al.*, 2009b et Xie, 2009]. Certains auteurs, qui ont étudié plus en profondeur la prise des mélanges avec CVA, ont observé que le moment de la prise initiale et le moment de la prise finale arrivaient plus tôt et que le temps de prise était aussi globalement diminué [Frias *et al.*, 2008b, Vegas *et al.*, 2009b et Xie, 2009]. Plus particulièrement, plus il y a de CVA, plus le début de la prise s'effectue rapidement, mais c'est la fin de la prise qui diminue de façon plus importante, causant une réduction du temps de prise [O'Farrell *et al.*, 2002].

Cette accélération de la prise pourrait s'expliquer par la présence de chaux, qui s'hydrate rapidement. L'hydratation rapide d'un composé de brédigite (ou  $\alpha'$ -C<sub>2</sub>S) pourrait aussi contribuer à la prise initiale rapide [Bai *et al.*, 2003 et Chaipanich *et al.*, 2005].

La grande finesse de la CVA augmenterait aussi la surface totale des grains disponibles pour réagir à jeune âge et viendrait diminuer le temps de prise [Frias *et al.*, 2008b].

D'autres auteurs attribuent ce phénomène à la présence de métakaolin et de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>). En effet, le CaCO<sub>3</sub> accélérerait la prise et le métakaolin accélérerait l'hydratation du C<sub>3</sub>S. La CVA agirait comme filler et fournirait plus de sites de nucléation, ce qui faciliterait l'hydratation du ciment [Vegas *et al.*, 2009b].

Certains auteurs ont tenté d'atténuer la prise rapide, notamment par l'utilisation conjointe de CVA et de laitier [O'Farrell *et al.*, 2002, Bai *et al.*, 2003]. En remplaçant 50 % de la CVA par du laitier, le moment de la prise finale est retardé, ce qui fait en sorte d'augmenter le temps de prise global. Pour des remplacements de 60 et 80 % de ciment par un mélange moitié laitier, moitié CVA, la prise finale va même jusqu'à 1 et 3 jours. Le début de la prise ne semble pas trop affecté, c'est plutôt la fin de prise qui est modifiée [O'Farrell *et al.*, 2002].

Du gypse a aussi été utilisé pour augmenter le temps de prise. Cependant, plus il y a de CVA, moins le gypse est effectif [Chaipanich *et al.*, 2005].

Finalement, Mozaffari *et al.*, (2009) ont testé des CVA obtenues par « wet-milling », c'est-à-dire par voie humide. L'utilisation de telles cendres a pour effet d'allonger le début et la fin de

la prise, puisque le CaO est dispersé et désaggloméré en solution et l'enchevêtrement des produits d'hydratation est plus long.

#### 2.4.5 Chaleur d'hydratation

Des résultats de chaleur d'hydratation viennent supporter la prise rapide, puisque la chaleur d'hydratation est d'autant plus importante qu'il y a de CVA dans le mélange [Chaipanich *et al.*, 2005, Banfill et Frias, 2007, Rodriguez *et al.*, 2008 et Xie, 2009]. Plus particulièrement, le pic de la courbe du flux thermique en fonction du temps augmente et est décalé vers la gauche, signifiant qu'il y a une accélération et une augmentation du dégagement de chaleur [Banfill et Frias, 2007, Rodriguez *et al.*, 2008 et Xie, 2009]. De la chaleur mesurée dans un calorimètre semi-adiabatique montre que la cendre accélère l'hydratation en déplaçant le pic à 15,5 h et à 13,3 h pour 10 % et 20 % de remplacement respectivement comparativement à 17,8 h pour le témoin. De plus la température maximale passe de 53,8°C pour le témoin à 56.9°C et 55.7°C pour des remplacements de 10 % de 20 % respectivement [Rodriguez *et al.*, 2008].

Tout comme pour l'accélération de la prise, le dégagement de chaleur proviendrait principalement de l'hydratation de la chaux et de la bedigite ( $\alpha'$ C<sub>2</sub>S ou  $\alpha'$ C<sub>2</sub>A) [Chaipanich *et al.*, 2005]. Ils ont mesuré que l'hydratation du CaO serait responsable à 64% de la chaleur d'hydratation de la CVA après la première heure. Après cette heure, ça serait l'hydratation du brédigite et du CH qui serait responsable du dégagement de chaleur. Cependant, le maximum de chaleur se situe vraiment entre 0 et 1 heure. Les CVA obtenues par « wet-milling » de Mozaffari *et al.*, (2009) dégagent évidemment moins de chaleur, puisqu'une certaine partie du CaO a déjà réagit durant le processus.

L'effet de dilution du ciment par la CVA semble aussi avoir son impact sur l'accélération de l'hydratation du ciment [Banfill et Frias, 2007], plus particulièrement sur les phases Alite et Aluminate [Rodriguez *et al.*, 2008]. De plus, avec sa grande finesse, la CVA fournirait plus de sites de nucléation, favorisant aussi l'hydratation à jeune âge [Banfill et Frias, 2007].

L'effet pouzzolanique de la CVA serait aussi à l'origine de dégagement de chaleur [Rodriguez *et al.*, 2008], allant même à dire que la consommation du CH par la CVA pour produire d'autres produits d'hydratation réduirait la concentration en CH dans la solution, poussant le ciment à en produire d'autres plus rapidement [Banfill et Frias, 2007].

Finalemeht, la CVA favoriserait la formation de carboaluminate de calcium [Banfill et Frias, 2007].

## 2.4.6 Autres

D'autres études montrent quelques effets intéressants des CVA sur les systèmes cimentaires.

Par exemple, en plus d'améliorer les résistances mécaniques, l'utilisation conjointe du laitier avec la CVA réduit de façon significative le volume et le diamètre moyen des pores, ainsi que l'expansion, se rapprochant même des valeurs du témoin. La pâte composée de 100% de CVA montre beaucoup d'expansion, mais sans toutefois dépasser la limite permise (6 mm d'expansion sur un maximum de 10 mm permis) [Bai *et al.*, 2003].

Le remplacement du sable par la CVA diminuerait la résistance en flexion. Pour pallier à ces effets, Soh *et al.*, (1995) ont introduit un polymère au latex, qui aide à minimiser la perte de résistance en flexion.

En incorporant de la CVA, cela a pour effet d'augmenter le seuil de cisaillement. La grande finesse de la CVA serait à l'origine de ce comportement, car elle augmente les attractions entre particules [Banfill et Frias, 2007].

Les CVA augmentent la résistance aux cycles de gel-dégel. Avec 20 % de remplacement du ciment, le nombre de cycles passerait à 100 comparativement à 40 pour le témoin. La perte de résistances après un nombre de cycles est aussi moins importante pour les mélanges avec CVA. L'affinage des pores que procurent les CVA serait à l'origine de leur meilleure performance [Vegas *et al.*, 2009a]. Dans le cas de la CVK [Xie, 2009], les bétons montrent un excellent comportement au gel-dégel. Les facteurs de durabilité des mélanges avec CVK varient entre 97 et 112 % après 300 cycles, ce qui dépasse l'exigence de 60 % de la norme ASTM C 666.

Des essais de retrait au séchage ont aussi été effectués et démontrent que la CVA augmente de façon significative le retrait, allant jusqu'à 2,5 fois plus. Ce phénomène pourrait être expliqué par plusieurs facteurs : l'apport en sites de nucléation accélère l'hydratation du ciment, et donc le retrait aussi; une réaction pouzzolanique a lieu entre le métakaolin et le CH produit par l'hydratation du ciment; et les tensions capillaires augmentent à cause de l'affinage des pores,

ce qui augmente de retrait endogène [Vegas *et al.*, 2009b]. Par contre, Xie, 2009, a observé de l'expansion pour des quantités de remplacement élevées de ciment, ce qui pourrait compenser une certaine partie du retrait.

Certains essais de perméabilité aux ions chlore ont aussi été effectués [Rabehi et Ghernouti, 2009]. Les résultats montrent qu'entre 10 et 15 % de remplacement du ciment par la CVA réduit la pénétration des ions grâce à l'affinage des pores et à la production de plus d'hydrates. Les mélanges avec CVA auraient aussi de meilleurs comportements au retrait empêché ainsi qu'à l'attaque à l'acide sulfurique. La CVK de Xie, 2009, obtient une basse perméabilité, spécialement à long terme. En effet, après 28 jours, elle obtient de meilleurs résultats que le témoin, tandis qu'elle était comparable au témoin avant 28 jours.

Parmi les autres options de valorisation, la cendre pourrait servir de combustible pour les cimenteries lorsqu'elles contiennent moins de 50 % de la somme de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , selon les normes ASTM [Pera et Ambroise, 1999].

## 2.5 Hypothèses

En comparaison avec les CVN, la CVK s'apparente plus à une CVC, puisqu'elle contient une quantité importante de CaO. Si la CVK se comporte comme une CVC, elle aura les comportements suivants;

- Il devrait y avoir un retard dans l'hydratation du mélange comparativement à un témoin;
- La chaleur dégagée devrait être plus faible;
- Le temps de prise devrait être plus long;
- Le gain de résistances mécaniques à court terme devrait diminuer, mais les résistances mécaniques à long terme devraient être supérieures à celles d'un témoin;
- L'affaissement devrait être plus grand;
- La perméabilité devrait diminuer;

Cependant, selon les travaux effectués sur des CVA provenant de l'industrie des pâtes et papiers, comme la CVK, les comportements suivants devraient avoir lieu;

- La chaleur dégagée devrait être plus grande, puisque les CVA contiennent une quantité plus importante de CaO que les CVN, qui réagit rapidement. De plus, elles ont une

plus grande finesse (entre environ 500 et 1250 m<sup>2</sup>/kg) comparativement aux CVN (entre 400 et 700 m<sup>2</sup>/kg), augmentant ainsi les réactions à jeune âge;

- Le temps de prise devrait être plus court, pour les mêmes raisons que la chaleur dégagée sera plus grande;
- Le gain de résistance devrait se faire à plus court terme;
- La demande en eau devrait augmenter, donc l'affaissement devrait diminuer;
- Peu d'essais ont été faits sur la perméabilité, mais puisque les CVA semblent affiner les pores, tout porte à croire qu'elle devrait diminuer.

Finalement, il y a la possibilité d'avoir des problèmes d'entraînement d'air à l'intérieur des bétons afin de résister aux cycles de gel/dégel, puisque la PAF est assez élevée, ce qui indique que la teneur en carbone non brûlée est élevée.

Les résultats obtenus sur les coulis et mortiers lors des premiers travaux [Xie, 2009] montrent un taux optimal de remplacement du ciment par des CVK autour de 20 % pour des bétons ordinaires. Il est donc raisonnable de croire que le taux optimal sur des bétons sera similaire. De plus, par rapport aux critères de performances, les CVK montrent un bon potentiel d'utilisation, notamment grâce à leur grand pouvoir pouzzolanique, qui leur permet d'atteindre de bonnes résistances mécaniques à long terme.



# CHAPITRE 3

## PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 3.1 Définition et objectifs du projet de recherche

Le principal objectif du projet est de caractériser l'effet de la CVK sur les bétons afin d'en optimiser son potentiel d'utilisation.

Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d'abord, une optimisation de la cendre produite devra être faite afin d'obtenir les meilleures performances sur béton et aussi apprendre à connaître la cendre et ses propriétés. Par la suite, toujours dans le but d'améliorer les performances sur les bétons, une étude sera faite afin de vérifier la compatibilité avec différents superplastifiants (SP). De plus, des mélanges ternaires seront faits afin de voir si des combinaisons peuvent mettre en avant les performances des CVK.

À la fin de ce projet, l'usine Kruger devrait être en mesure de connaître la composition optimale de la CVK à obtenir afin de doser judicieusement les matières servant de combustible et ainsi produire un ACA le plus intéressant possible pour l'industrie du béton.

### 3.2 Méthodologie

La Figure 3.1 résume le plan d'expérience du projet de recherche avec tous les mélanges et essais effectués.

# Effets des cendres volantes provenant de l'incinération des boues de désencrage des usines de cogénération sur les bétons

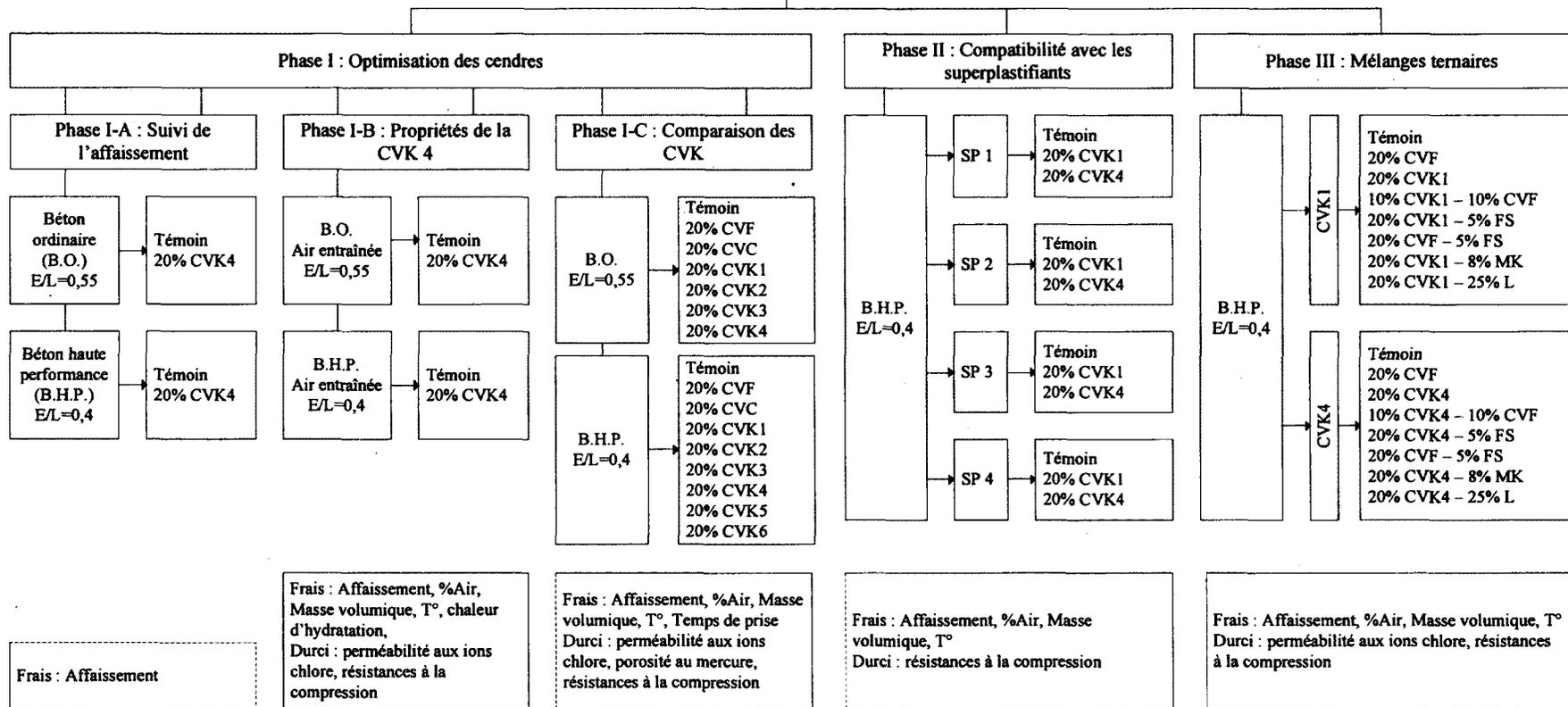


Figure 3.1: Plan expérimental

### 3.2.1 Phase I : Optimisation des cendres

L'objectif de cette phase est de trouver la cendre offrant les meilleures performances dans les bétons. Plusieurs cendres ont été reçues à différents moments de la production de l'usine entre avril 2008 et mai 2010. Les matières premières introduites dans le four n'étaient donc pas les mêmes et les performances sur bétons peuvent être différentes.

Des bétons ordinaires (BO) de rapport E/L=0,55 et des bétons à haute performance (BHP) de rapport E/L=0,4 ont été faits avec chacune des cendres, tous ayant un taux de substitution de 20 % du ciment Portland. Ce taux de substitution a été choisi en regard des résultats précédents [Xie, 2009], qui indiquent un taux de substitution optimal à 20 % pour des BHP. Avant l'optimisation des différentes cendres, deux phases préliminaires ont été faites avec la cendre la plus récente à ce moment, soit Avril 2009 (CVK4). La phase I-A étudie la perte d'affaissement dans le temps tandis que la phase I-B étudie des mélanges à air entraîné. Ces mélanges préliminaires avaient pour but de mieux comprendre le comportement des cendres avant de débiter les essais d'optimisation. Le superplastifiant Pastol 5000, de type polycarboxylate, a été utilisé pour tous les essais de la phase I. Les Tableau 3.1, Tableau 3.2 et Tableau 3.3 présentent les essais effectués sur les bétons de la phase I-A, I-B et I-C respectivement.

**Tableau 3.1 : Essais de la phase I-A**

Essais	Délais	Normes ASTM
Affaissement	10, 30, 60, 90 et 120 minutes	C 143

**Tableau 3.2 : Essais de la phase I-B**

	Essais	Délais	Normes ASTM
État frais	Affaissement	10 et 30 minutes	C 143
	Teneur en air	10 et 30 minutes	C 231
	Masse volumique	10 et 30 minutes	C 138
	Température	10 et 30 minutes	C 1064
	Chaleur d'hydratation	N/A	-
État durci	Résistances à la compression	1, 7, 28, 91 jours, 6 mois et 1 an	C 39
	Perméabilité aux ions chlorures	28 et 91 jours	C 1202

**Tableau 3.3 : Essais de la phase I-C**

	<b>Essais</b>	<b>Délais</b>	<b>Normes ASTM</b>
<b>État frais</b>	Affaissement	10, 30 et 60 minutes	C 143
	Teneur en air	10 et 60 minutes	C 231
	Masse volumique	10 et 60 minutes	C 138
	Température	10 et 60 minutes	C 1064
	Temps de prise*	N/A	C 403
<b>État durci</b>	Résistances à la compression	1, 7, 28, 91 jours, 6 mois et 1 an	C 39
	Perméabilité aux ions chlorures	28 et 91 jours	C 1202

\* Seulement sur les bétons de rapport E/L=0,4

### 3.2.2 Phase II : Compatibilité avec les superplastifiants

Une étude a été faite afin de vérifier la compatibilité des cendres avec quatre différents SP de type polycarboxylate. Deux des cendres reçues ont été sélectionnées afin de conduire l'étude, soit la cendre d'Avril 2008 (CVK 1) et d'Avril 2009 (CVK 4). Elles ont été choisies pour leur comportement différent sur les bétons, la première étant très fine et montrant de bonnes résistances à la compression, la deuxième montrant des résistances à la compression plus faibles. Un taux de 20 % de remplacement du ciment Portland a aussi été utilisé, afin de rester cohérent avec le reste du projet. Pour chaque superplastifiant, trois mélanges ont donc été faits; un témoin et deux mélanges à 20 % de remplacement du ciment Portland par chacune des CVK. Le Tableau 3.4 présente les essais effectués sur les bétons de la phase II. Un rapport E/L=0,4 a été utilisé pour tous les mélanges.

**Tableau 3.4 : Essais de la phase II**

	<b>Essais</b>	<b>Délais</b>	<b>Normes ASTM</b>
<b>État frais</b>	Affaissement	10, 30 et 60 minutes	C 143
	Teneur en air	10 et 60 minutes	C 231
	Masse volumique	10 et 60 minutes	C 138
	Température	10 et 60 minutes	C 1064
<b>État durci</b>	Résistances à la compression	1, 7, 28, 91 jours, 6 mois et 1 an	C 39

### 3.2.3 Phase III : Mélanges ternaires

Cette phase a deux objectifs. Le premier est de savoir si la variabilité entre les différentes CVK reçues peut être diminuée à l'intérieur de systèmes ternaires. Le second est de trouver une combinaison optimale permettant d'allier les avantages de la CVK en diminuant ses inconvénients par l'ajout d'un troisième matériau. Un témoin à 100 % de ciment Portland a été fait suivi de deux mélanges binaires, le premier avec 20% de CVK et le deuxième avec 20% de CVF. Par la suite, un troisième matériau a été ajouté au mélange avec 20% de CVK pour composer les mélanges ternaires. La fumée de silice (FS), le métakaolin (MK) et le laitier (L) ont chacun été utilisés à un taux de substitution de 5, 8 et 25 % respectivement. En plus de ces mélanges, une combinaison de 10 % de CVK avec 10 % de CVF a été faite en plus d'une combinaison de 20 % de CVF avec 5 % de FS. Tout comme à la phase II, deux des cendres Kruger ont été sélectionnées afin de conduire l'étude, soit la CVK 1 et la CVK 4. Le Tableau 3.5 présente les essais effectués sur les bétons de la phase III.

**Tableau 3.5 : Essais de la phase III**

	<b>Essais</b>	<b>Délais</b>	<b>Normes ASTM</b>
<b>État frais</b>	Affaissement	10, 30 et 60 minutes	C 143
	Teneur en air	10 et 60 minutes	C 231
	Masse volumique	10 et 60 minutes	C 138
	Température	10 et 60 minutes	C 1064
<b>État durci</b>	Résistances à la compression	1, 7, 28, 91 jours, 6 mois et 1 an	C 39
	Perméabilité aux ions chlorures	28 et 91 jours	C 1202

## 3.3 Matériaux utilisés

### 3.3.1 Ciment

Le ciment utilisé tout au long du projet est un ciment Portland de type GU. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées au Tableau 3.6.

**Tableau 3.6 : Composition chimique et propriétés physiques du ciment**

<b>Ciment GU</b>	
<b>Composition chimique (%)</b>	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20,43
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,70
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,92
<b>CaO</b>	62,39
<b>MgO</b>	1,81
<b>SO<sub>3</sub></b>	3,53
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,95
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,18
<b>Alcalis équivalents*</b>	0,80
<b>PAF</b>	2,51
<b>Composition de Bogue (%)</b>	
<b>C<sub>3</sub>S</b>	52,9
<b>C<sub>2</sub>S</b>	18,7
<b>C<sub>3</sub>A</b>	7,5
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	8,9
<b>Propriétés physiques</b>	
<b>Densité</b>	3,20
<b>Surface spécifique</b>	394
<b>Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>	3
<b>BET (m<sup>2</sup>/g)</b>	3

\*Na<sub>2</sub>O équivalent = 0,658 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O

### 3.3.2 Ajouts cimentaires

Les caractéristiques chimiques et physiques des AC sont données au Tableau 3.7. Le métakaolin (MK) est commercialisé sous le nom de METAMAX et provient de la compagnie BASF. Le laitier (L) et les CVN proviennent de la compagnie Holcim et la fumée de silice (FS) provient de la compagnie SKW Canada Inc.

**Tableau 3.7 : Caractéristiques chimiques et physiques des ajouts cimentaires**

<b>Ajouts cimentaires :</b>	<b>CVC</b>	<b>CVF</b>	<b>FS</b>	<b>MK</b>	<b>L</b>
<b>Composition chimique (%)</b>					
<b>SiO<sub>2</sub></b>	53,30	49,92	95,40	53,0	37,79
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	23,10	27,61	0,35	43,8	7,83
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,40	12,28	0,03	0,43	0,66
<b>CaO</b>	10,00	3,71	1,12	0,02	40,33
<b>MgO</b>	1,10	0,93	0,42	0,03	10,32
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,10	0,30	0,07	0,03	0,65
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	1,82	0,93	0,19	0,44
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	0,35	0,13	0,23	0,19
<b>Alcalis équivalents</b>	3,24	1,54	0,75	0,36	0,48
<b>PAF</b>	0,40	1,90	1,27	0,46	0,81
<b>Propriétés physiques</b>					
<b>Densité</b>	2,15	2,36	2,22	2,50	2,87
<b>Surface spécifique Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>	404	350	-	-	324
<b>BET (m<sup>2</sup>/g)</b>	-	-	20	13	-

### 3.3.3 Cendres volantes Kruger

Plusieurs CVK ont été reçues à différents moments de la production de l'usine de pâtes et papiers Kruger. Leur composition chimique ainsi que quelques caractéristiques physiques sont présentées au Tableau 3.8. Toutes les CVK ont une teneur importante en CaO, suivi du SiO<sub>2</sub> et du Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Il est possible de constater que leurs caractéristiques varient beaucoup entre elles. Par exemple, la teneur en CaO peut varier entre 31,43 à 49,55 % d'une CVK à l'autre. Les composés principaux, comme le SiO<sub>2</sub>, le Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et la PAF varient de façon assez importante entre les CVK.

Afin de tenter de comprendre les différences entre les CVK, le Tableau 3.9 présente l'origine des boues de chacune des CVK ainsi que les différentes températures de combustion. La majorité des CVK ont une plus grande proportion de boues de désencrage par rapport aux boues primaires et secondaires (mixtes). Selon les diffractions aux rayons X des boues, il est possible de dire que les boues de Crabtree et Candiatic sont similaires et constituent la meilleure source de calcite. Les boues de désencrage de Kingseyfall sont aussi une bonne source de calcite. Les boues de Bromptonville, autant mixtes que de désencrage, sont une très bonne

source de Kaolin. Finalement, les boues mixtes de Kingseyfall contiennent beaucoup de cellulose.

**Tableau 3.8 : Caractéristiques chimiques et physiques des CVK**

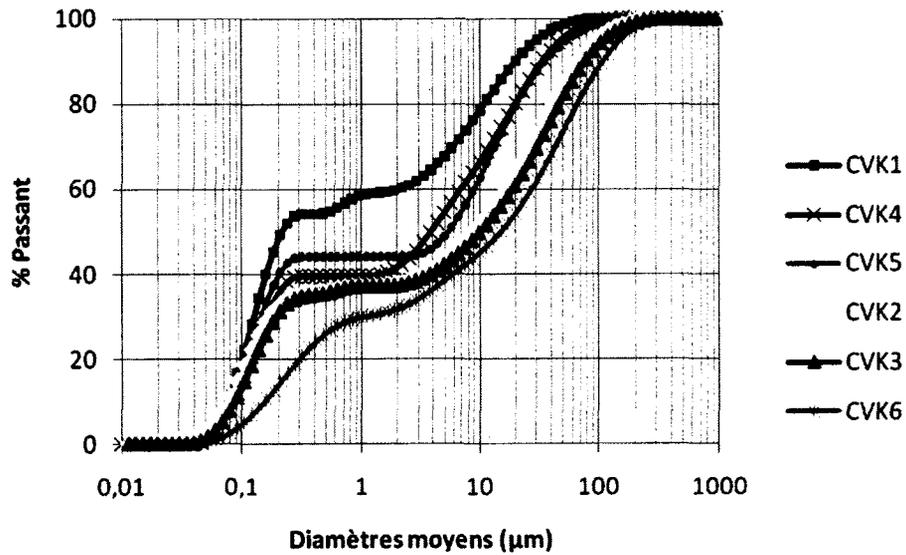
<b>Date de production</b>	<b>Avr.08</b>	<b>Nov.08</b>	<b>Déc.08</b>	<b>Avr.09</b>	<b>Jan.10</b>	<b>Mai 10</b>
<b>Nom utilisé</b>	<b>CVK 1</b>	<b>CVK 2</b>	<b>CVK 3</b>	<b>CVK 4</b>	<b>CVK 5</b>	<b>CVK 6</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	24,87	26,60	29,12	20,18	20,73	35,52
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,08	14,41	14,50	10,16	12,47	20,62
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,66	1,76	2,40	1,89	1,53	2,01
<b>CaO</b>	45,12	35,17	32,85	44,44	49,55	31,43
<b>MgO</b>	1,88	2,42	3,02	2,14	2,60	2,36
<b>SO<sub>3</sub></b>	1,86	3,41	4,55	4,25	6,60	1,63
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,77	0,72	1,01	0,71	0,56	0,92
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,72	0,46	0,64	0,42	0,61	0,95
<b>Alcalis équivalents</b>	1,23	0,94	1,30	0,89	0,98	1,56
<b>CaO libre</b>	11,64	4,67	3,39	6,82	12,60	3,06
<b>Cl</b>	0,43	0,84	1,79	1,22	N/A	N/A
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,94	0,88	1,02	0,68	1,42	2,29
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,97	0,56	1,34	0,58	0,67	1,04
<b>SrO</b>	0,12	0,04	0,09	0,07	0,05	0,04
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,11	0,07	0,09	0,11	0,07	0,10
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04
<b>ZnO</b>	0,03	0,05	0,06	0,04	0,16	0,13
<b>PAF</b>	6,44	12,59	7,53	13,08	2,71	0,63
<b>Densité</b>	2,67	2,57	2,50	2,91	2,90	2,68
<b>Surface spécifique Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>	1195	614	483	1225	885	520
<b>% &lt; 3 µm</b>	63	36	39	46	45	35

**Tableau 3.9 : Conditions de production des CVK**

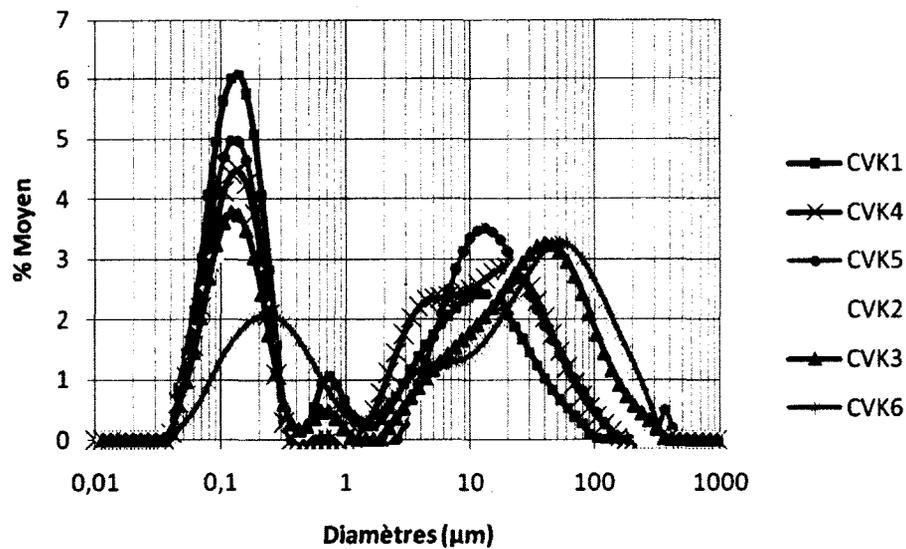
<b>Origine des boues</b>	<b>CVK 1</b>	<b>CVK 2</b>	<b>CVK 3</b>	<b>CVK 4</b>	<b>CVK 5</b>	<b>CVK 6</b>
<b>Proportion des boues (%)</b>						
<b>Bromptonville (boues mixtes)</b>	9	20	31	28	29	24
<b>Bromptonville (boues désencrage)</b>	18	28	17	19	33	44
<b>Crabtree (boue désencrage)</b>	33	19	39	33	31	30
<b>Kingseyfall (boues mixtes)</b>	3	8	6	-	-	-
<b>Kingseyfall (boues désencrage)</b>	14	-	-	20	5	-
<b>Breakyville (boues mixtes)</b>	6	-	-	-	-	-
<b>Breakyville (boues désencrage)</b>	7	-	-	-	-	-
<b>Thurso (boues mixtes)</b>	-	21	7	-	-	-
<b>Lennoxville (boues primaires)</b>	-	4	-	-	2	3
<b>Candiac (boues désencrage)</b>	10	-	-	-	-	-
<b>Total boues primaires et secondaires</b>	18	53	44	28	31	27
<b>Total boues désencrage</b>	82	47	56	72	69	74
<b>Températures de combustion (°C)</b>						
<b>Lit</b>	750	755	730	700	765	675
<b>Zone libre</b>	770	840	855	810	835	800
<b>Sortie foyer</b>	900	880	900	890	890	900

La finesse et la distribution granulométrique varient aussi beaucoup. La Figure 3.2 illustre la distribution granulométrique des CVK. La CVK 1 est celle ayant les particules les plus fines en moyenne, suivi de la CVK 4 et de la CVK 5. Par la suite les CVK 2 et 3 sont très similaires. La CVK 6 n'a pas autant de fines que les autres. Toutes les cendres sont comprises entre environ 0,035 et 400  $\mu\text{m}$ . Le diamètre moyen  $D_{50}$  varie entre 0,2 et 15  $\mu\text{m}$  approximativement.

La Figure 3.3 illustre la distribution non cumulée des particules. Les courbes sont bimodales pour toutes les cendres. Il est intéressant de constater que toutes les CVK, sauf la CVK 6, ont un premier pic à la taille de 0,15  $\mu\text{m}$ . La CVK 6 a son premier pic aux alentours de 0,25  $\mu\text{m}$ . La distribution de chacune des cendres varie après ce premier pic, mais un deuxième pic est observable entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ .



**Figure 3.2: Distribution granulométrique des cendres Kruger**



**Figure 3.3: Distribution non cumulée des particules des cendres Kruger**

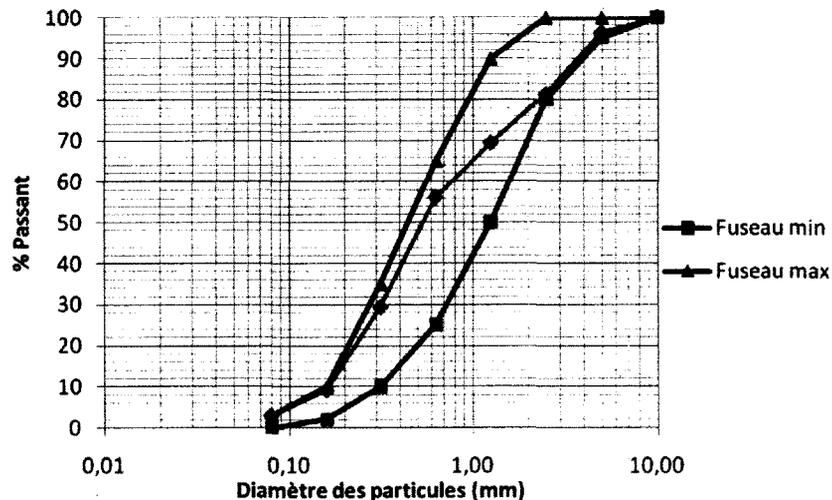
### 3.3.4 Sable

Le sable utilisé durant le projet provient de la carrière St-Dominique, Québec. Il a une densité SSS de 2,65 et une absorption de 1,16. Les densités et absorptions ont été faites selon la norme

CSA A23.2-6A. Sa granulométrie est donnée au Tableau 3.10 et illustrée à la Figure 3.4. Les granulométries ont été faites selon les normes CSA A23.1 et CSA A23.2-2A.

**Tableau 3.10 : Distribution granulométrique du sable**

Ouverture des tamis (mm)	Tamisat cumulé (%)	Fuseau normalisé (%)
10	100	100-100
5	96	95-100
2,5	81	80-100
1,25	69	50-90
0,630	56	25-65
0,315	29	10-35
0,160	9	2-10
0,080	3	0-3



**Figure 3.4 : Courbe granulométrique du sable**

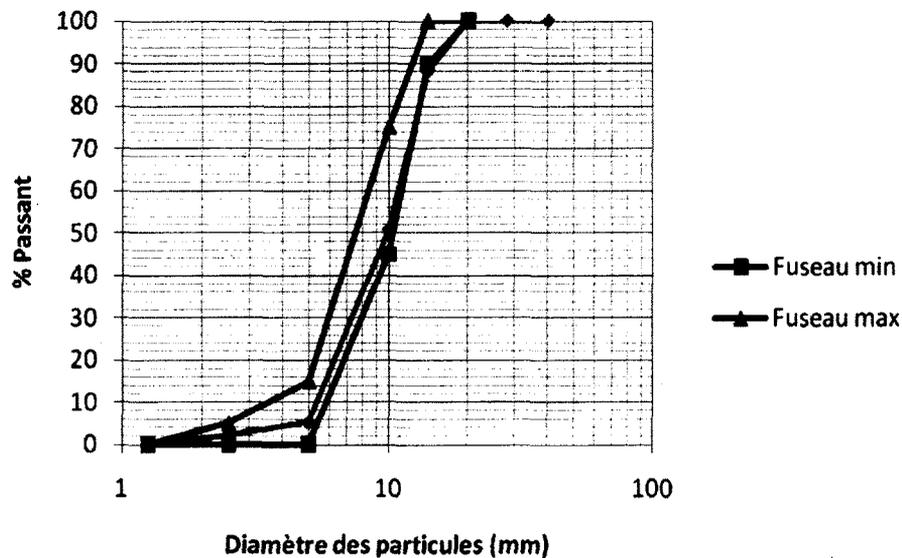
### 3.3.5 Gros granulats

Les gros granulats proviennent de la carrière de St-Dominique, Québec. Des granulats 10-20 mm et 5-14 mm ont été utilisés. Leur granulométrie ainsi que leurs propriétés sont présentées au Tableau 3.11. Les granulométries ont été faites selon les normes CSA A23.1 et CSA A23.2-2A. Les densités et absorptions ont été faites selon la norme CSA A23.2-12A.

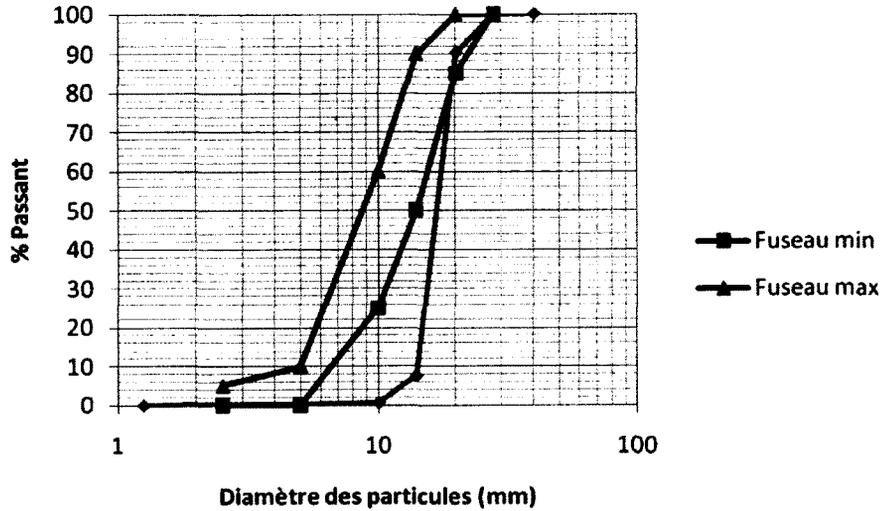
**Tableau 3.11 : Distribution granulométrique et propriétés des gros granulats**

Types de gros granulats			
Ouverture des tamis (mm)	10-20 mm	5-14 mm	Fuseau 5-20 mm
28	100	100	100-100
20	90	100	85-100
14	8	88	60-90
10	1	51	25-60
5	0	5	0-10
2,5	0	2	0-5
1,25	0	0	0
<b>Densité SSS</b>	2,73	2,71	-
<b>Absorption</b>	0,34	0,47	-

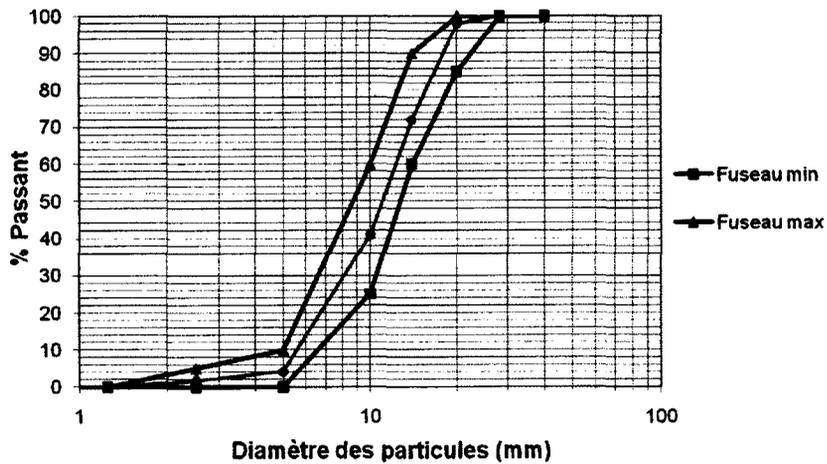
Les granulométries sont illustrées aux Figure 3.5 et Figure 3.6 pour les granulats 5-14 mm et 10-20 mm respectivement. Afin de satisfaire la courbe granulométrique de la norme CSA, une combinaison de 20 % de granulats 10-20 mm et 80 % de granulats 5-14 mm a été faite. La courbe granulométrique résultante est illustrée à la Figure 3.7.



**Figure 3.5 : Courbe granulométrique de la pierre 5-14 mm**



**Figure 3.6 : Courbe granulométrique de la pierre 10-20 mm**



**Figure 3.7 : Courbe granulométrique combinée**

### 3.3.6 Eau de gâchage

L'eau utilisée provient du réseau d'eau potable de la ville de Sherbrooke.

### 3.3.7 Adjuvants

Pour tout le projet, le SP Plastol 5000 de type polycarboxylate a été utilisé. Dans le cadre de la phase III, trois autres SP de type polycarboxylate ont été testés; Adva 405, Viscocrete 2100 et Glenium 7102. Lors de la phase I-B, un agent entraîneur d'air (AEA), AireX-L, a aussi été

utilisé. Leurs propriétés sont présentées au Tableau 3.12. Les SP répondent à la norme ASTM C494 et l'AEA répond à la norme ASTM C 260.

**Tableau 3.12 : Propriétés des différents adjuvants utilisés**

<b>Nom commercial</b>	<b>Compagnie</b>	<b>Type</b>	<b>Extrait sec (%)</b>	<b>Densité à 25°C (g/ml)</b>
<b>Plastol 5000</b>	Euclid	Superplastifiant à base de polycarboxylate	31,52	1,07
<b>Glenium 7102</b>	BASF	Superplastifiant à base de polycarboxylate	25,41	1,05
<b>Viscocrete 2100</b>	Sika	Superplastifiant à base de polycarboxylate	39,12	1,08
<b>Adva 405</b>	GRACE	Superplastifiant à base de polycarboxylate	19,49	1,04
<b>AireX-L</b>	Euclid	Agent entraîneur d'air	5,00	1,01

### **3.4 Procédure expérimentale**

#### **3.4.1 Séquence de malaxage**

Pour tout le projet, le malaxeur utilisé est un Monarch à axe de rotation vertical d'une capacité de 40L. La séquence de malaxage utilisée pour tous les bétons est présentée au Tableau 3.13.

**Tableau 3.13 : Séquence de malaxage pour les bétons**

<b>Description des étapes</b>	<b>Temps (min)</b>
1 Mettre le sable dans le malaxeur et malaxer 30 secondes	
2 Corriger la quantité d'eau et de sable	
3 Ajouter les granulats au malaxeur et malaxer durant 1:30 pour assurer l'homogénéisation	
4 Ajouter ½ de l'eau et l'AEA (lorsque requis) et malaxer 35 secondes exactement. Arrêter le malaxeur.	
5 Ajouter les liants et malaxer durant 3 minutes.	T = 0:00
6 Après les premières 30 secondes de malaxage, ajouter lentement l'autre ½ d'eau et le SP.	T = 0:30
7 Arrêter le malaxeur durant 2 minutes	T = 3:00
8 Reprendre le malaxage entre 5 et 8 minutes	T = 5:00
9 Arrêter le malaxeur	T = 8:00
10 Faire les essais de 10 minutes	T = 10:00
11 Malaxer 40 secondes avant les essais de 30 minutes	T = 29:20
12 Faire les essais de 30 minutes	T = 30:00
13 Malaxer 40 secondes avant les essais de 60 minutes	T = 59:20
14 Faire les essais de 60 minutes	T = 60:00
15 Échantillonner	

### 3.4.2 Méthodes de cure et d'échantillonnage

Le Tableau 3.14 contient les méthodes utilisées pour confectionner, curer et coiffer les échantillons ainsi que la méthode utilisée pour faire la teneur en eau du sable lors du malaxage.

**Tableau 3.14 : Méthodes de cure et d'échantillonnage**

<b>Essais</b>	<b>Normes ASTM</b>
<b>Échantillonnage et cure</b>	C 192
<b>Coiffage</b>	C 617
<b>Teneur en eau du sable</b>	C 566



# CHAPITRE 4

## RÉSULTATS DE LA PHASE I – A :

### Suivi de l'affaissement

Tout d'abord, afin de se familiariser avec les CVK et avoir une idée de leur consommation en SP, une étude a été faite sur la CVK 4. Cela consistait à suivre l'affaissement dans le temps à 10, 30, 60, 90 et 120 minutes. Les mélanges utilisés contenaient 20 % de CVK 4 en remplacement du ciment. Des bétons témoins contenant 100 % de ciment ont aussi été faits. Deux rapports E/L, 0,55 et 0,4, ont été testés.

Deux mélanges étaient faits simultanément. Les deux mélanges avaient une même quantité de SP initiale afin d'avoir un affaissement d'environ 140 mm pour les bétons de rapport E/L=0,55 et 205 mm pour les bétons de rapport E/L=0,4. Par la suite, un des deux mélanges se voyait ajouter du SP à chaque mesure, afin de garder son affaissement initial. L'autre mélange n'avait aucun autre ajout de SP. Les affaissements ont été notés, ainsi que la quantité de SP ajouté pour maintenir l'affaissement dans le temps du deuxième mélange.

La composition des mélanges est présentée au Tableau 4.1. Au total, huit mélanges ont été faits, chacun des 4 mélanges présentés devant être doublé. Les données brutes à l'état frais sont présentées au Tableau 4.2.

**Tableau 4.1 : Composition des mélanges de la phase I-A**

E/C	Mélanges	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )
0,55	Témoin	350	-	760	1070
	20% CVK 4	280	70	752	1070
0,4	Témoin	400	-	802	1070
	20% CVK 4	320	80	792	1070

Note : Les formulations corrigées en fonction des masses volumiques réelles sont présentées à l'Annexe A

**Tableau 4.2 : Données à l'état frais des mélanges de la phase I-A**

E/L	Mélanges	Affaissement (mm)					Quantité de SP cumulée (%)*				
		Temps (min)									
		10	30	60	90**	120	10	30	60	90**	120
0,55	Témoin sans ajout	140	120	105	-	65	0	0	0	-	0
	Témoin avec ajout	140	145	135	-	170	0	0	0,021	-	0,057
	20% CVK 4 sans ajout	155	80	25	20	-	0,113	0,113	0,113	0,113	-
	20% CVK 4 avec ajout	125	140	115	150	145	0,106	0,134	0,159	0,189	0,219
0,4	Témoin sans ajout	210	170	95	-	20	0,202	0,202	0,202	-	0,202
	Témoin avec ajout	210	215	210	-	200	0,202	0,214	0,235	-	0,269
	20% CVK 4 sans ajout	225	55	12	0	0	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
	20% CVK 4 avec ajout	210	215	215	190	190	0,310	0,391	0,428	0,484	0,484

\* Les quantités de SP totales sont données en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse du liant

\*\* Des valeurs à 90 minutes ont été prises pour les mélanges perdant leur affaissement plus rapidement

## 4.1 Mélanges de rapport E/L de 0,55

L'affaissement en fonction du temps, pour les mélanges de rapport E/L=0,55, est illustré à la Figure 4.1. Sans ajout de SP, le témoin ainsi que le mélange avec cendre perdent leur affaissement, mais il est possible de constater que celui avec la CVK 4 perd son affaissement plus rapidement.

De plus, la quantité de SP requise en fonction du temps pour garder un affaissement d'environ 140 mm est présentée à la Figure 4.2. Les droites des deux mélanges qui n'ont pas eu d'ajout de SP sont bien entendu constantes, mais il est possible de constater que la quantité initiale requise pour le mélange avec cendre est supérieure (0,113 % par rapport à 0 % pour le témoin).

Les droites des deux autres mélanges augmentent dans le temps, puisqu'il a fallu ajouter du SP pour maintenir l'affaissement. Dans le cas du témoin, la demande en SP est passée de 0 à 0,057 % entre 10 et 120 minutes, tandis que dans le cas du mélange avec CVK, la demande est

passée de 0,106 à 0,219 % entre 10 et 120 minutes. La demande en SP du mélange avec CVK a donc tendance à augmenter un peu plus vite dans le temps que le témoin. En effet, sa pente est de l'ordre de  $10 \cdot 10^{-4}$  %/min tandis que la pente du témoin est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-4}$  %/min.

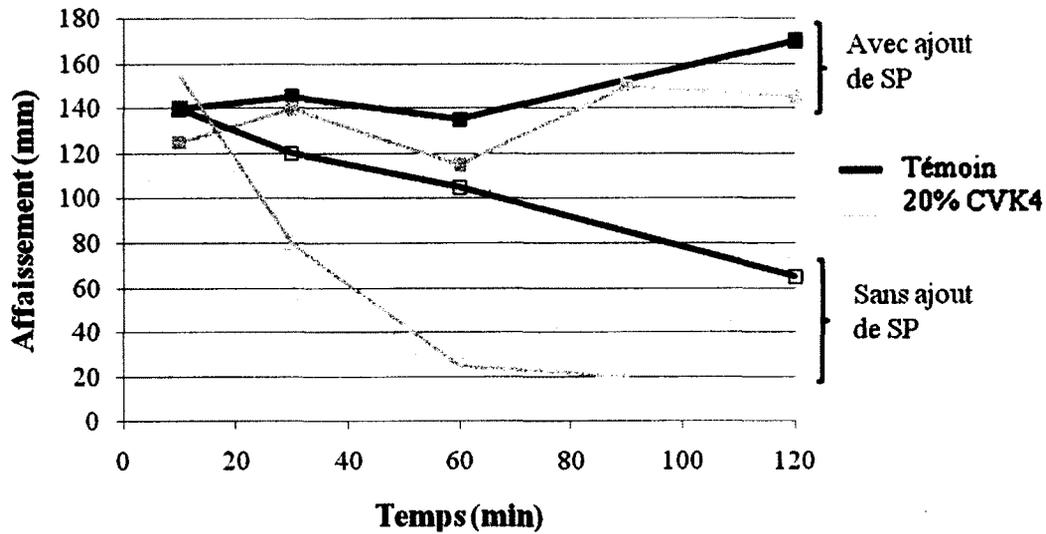


Figure 4.1 : Affaissement en fonction du temps (E/L=0,55)

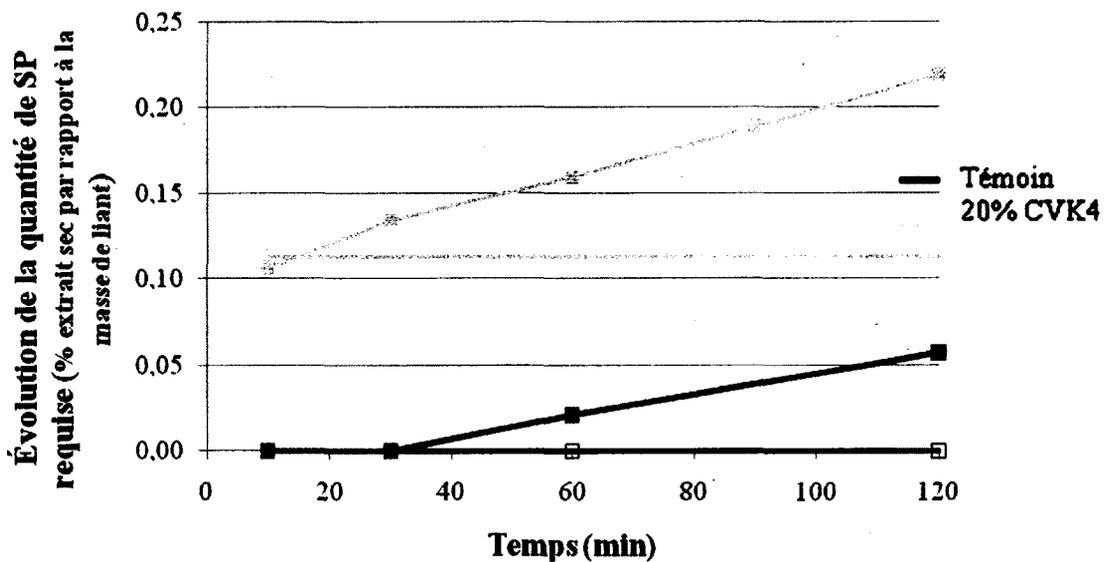


Figure 4.2 : Évolution de la demande en SP en fonction du temps (E/C=0,55)

## 4.2 Mélanges de rapport E/L de 0,4

L'affaissement en fonction du temps, pour les mélanges de rapport E/L=0,4, est illustré à la Figure 4.3. Sans ajout de SP, le témoin ainsi que le mélange avec 20% de CVK 4 perdent leur affaissement, mais il est possible de constater que celui avec CVK perd son affaissement plus rapidement, de façon semblable aux mélanges de rapport E/L=0,55.

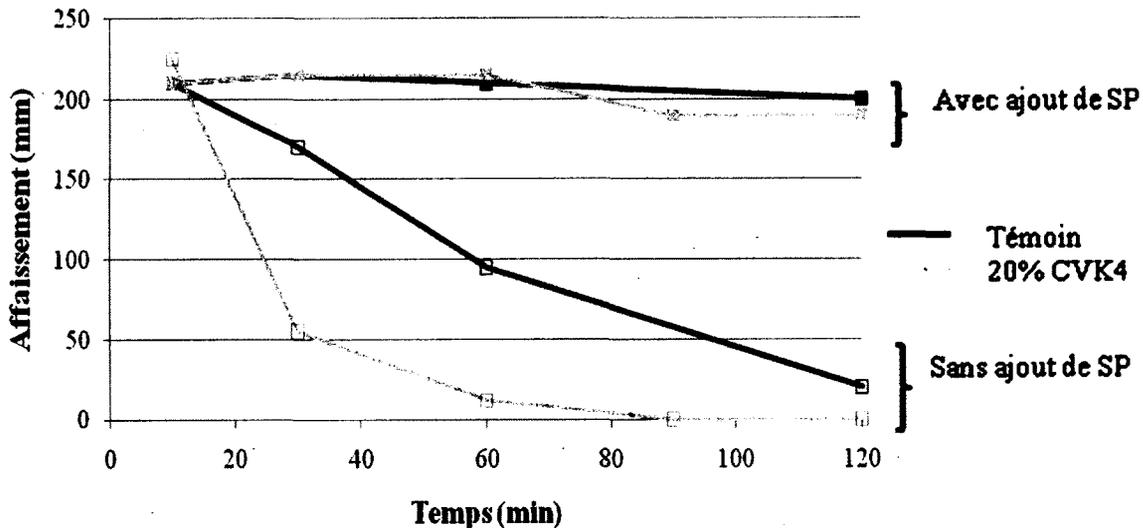
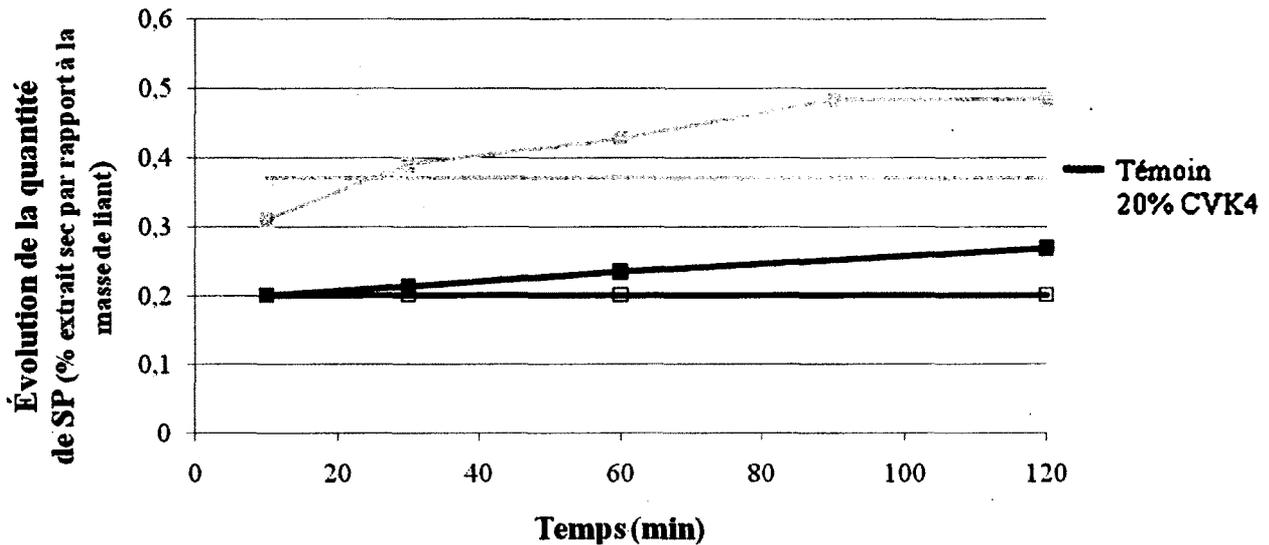


Figure 4.3 : Affaissement en fonction du temps (E/L=0,4)

De plus, la quantité de SP requise en fonction du temps pour garder un affaissement d'environ 205 mm est présentée à la Figure 4.4. Les droites des deux mélanges qui n'ont pas eu d'ajout de SP sont bien entendu constantes, mais il est possible de constater que la quantité initiale requise pour le mélange avec CVK est supérieure (0,370 % par rapport à 0,202 % pour le témoin).

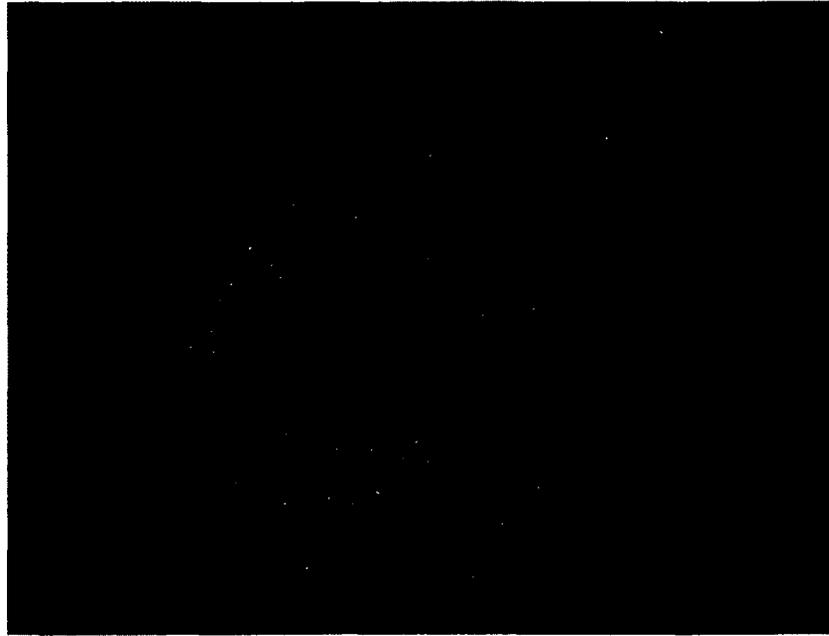
Les droites des deux autres mélanges augmentent dans le temps, puisqu'il a fallu ajouter du SP pour maintenir l'affaissement. Dans le cas du témoin, la demande en SP est passée de 0,202 à 0,269 % entre 10 et 120 minutes, soit une augmentation de 33 %. Dans le cas du mélange avec cendre, la demande est passée de 0,310 à 0,484 % entre 10 et 120 minutes, soit une augmentation de 56 %, ce qui est plus important que le témoin. La demande en SP de la CVK augmente donc plus vite dans le temps que le témoin, tout comme les résultats obtenus avec les mélanges de rapport E/L=0,55. En analysant la pente de l'évolution du SP dans le temps, celle du témoin est de l'ordre de  $6 \cdot 10^{-4}$  %/min, soit une valeur similaire que celle du témoin à

E/L=0,55, tandis que celle du mélange avec CVK est de l'ordre de  $16 \cdot 10^{-4}$  %/min, comparativement à  $10 \cdot 10^{-4}$  %/min pour un mélange E/L=0,55.

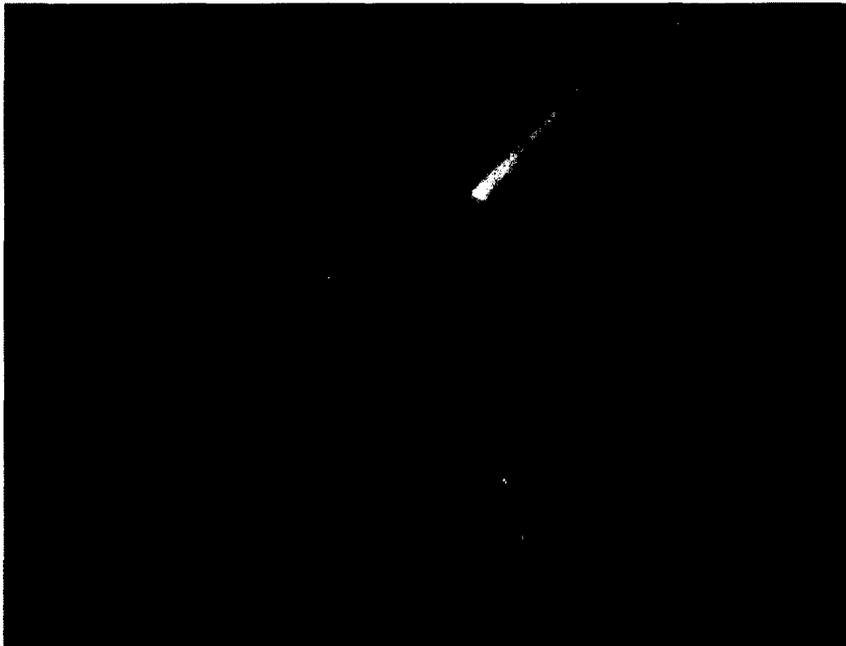


**Figure 4.4 : Évolution de la demande en SP en fonction du temps (E/L=0,4)**

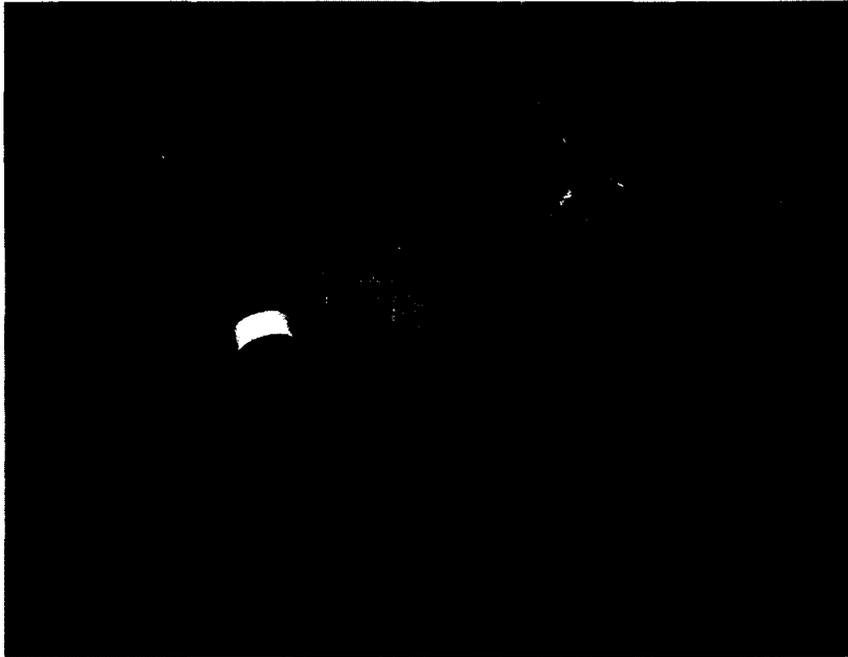
Bien que les photos suivantes n'aient pas été prises lors de la confection de ces mélanges en particulier, elles illustrent bien le comportement de l'affaissement des CVK dans le temps. La Figure 4.5 illustre l'affaissement à 10 minutes d'un mélange à E/L=0,4 effectué avec 20 % de CVK 4. Il est possible de voir qu'il y a de la ségrégation. À ce moment, l'affaissement est de 235 mm. À 30 minutes, l'affaissement obtenu est de 220 mm et il n'y a déjà plus de signe de ségrégation (Figure 4.6). Finalement, à 60 minutes, l'affaissement a déjà diminué à 150 mm (Figure 4.7). Aucun SP n'a été ajouté après la quantité initiale.



**Figure 4.5 : Affaissement à 10 minutes (20% CVK 4, E/L=0,4)**



**Figure 4.6 : Affaissement à 30 minutes (20% CVK 4, E/L=0,4)**



**Figure 4.7 : Affaissement à 60 minutes (20% CVK 4, E/L=0,4)**

### **4.3 Conclusions**

Le suivi de l'affaissement a permis d'observer qu'un mélange avec 20% de remplacement du ciment par la CVK 4 perdait son affaissement plus rapidement qu'un témoin. Cet effet est plus prononcé pour un E/L plus faible. En effet, à E/L=0,55, la demande en SP augmente 2 fois plus rapidement pour le mélange avec CVK, tandis qu'elle augmente 2,5 fois plus rapidement pour un E/L=0,4.

En effet, la finesse Blaine de la CVK 4 est de 1225 m<sup>2</sup>/kg comparativement à 394 m<sup>2</sup>/kg pour le ciment. Lorsqu'une partie du ciment est remplacée par un produit plus fin, il y a plus de surface à couvrir, ce qui a pour effet d'augmenter la consommation d'eau, ou dans notre cas de SP. Cependant, dans ce cas-ci, la demande augmente de façon importante, surtout pour un rapport E/L de 0,4. Cet aspect devra donc être pris en compte dans l'optimisation des CVK. Il faudra notamment vérifier si la consommation en SP des différentes CVK varie, et si c'est le cas, de trouver quel serait le compromis idéal.



# CHAPITRE 5

## RÉSULTATS DE LA PHASE I – B :

### Propriétés de la CVK 4

Une série de mélange avec air entraîné a été faite afin d'étudier quelques performances de la CVK 4 sur béton. Deux rapports E/L ont aussi été utilisés pour cette étude, soit 0,55 et 0,4. Les mélanges avec CVK sont utilisés à un taux de remplacement de 20 % du ciment, tandis que le témoin est à 100 % de ciment. Le Tableau 5.1 présente la composition des mélanges tandis que le Tableau 5.2 présente les données à l'état frais des mélanges effectués. Le SP utilisé est le Plastol 5000 et l'agent entraîneur d'air (AEA) est l'AireX-L.

**Tableau 5.1 : Composition des mélanges de la phase I-B**

E/L	Mélanges	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20 mm (kg/m <sup>3</sup> )
0,55	Témoin	350	-	641	1070
	20% CVK 4	280	70	637	1070
0,4	Témoin	400	-	684	1070
	20% CVK 4	320	80	679	1070

Note : Les formulations corrigées en fonction des masses volumiques réelles sont présentées à l'Annexe A

**Tableau 5.2 : Données à l'état frais des mélanges de la phase I-B**

E/L	Mélanges	AEA (ml/100kg liant)	SP (%)*	Affaissement (mm)		Air (%)		M. Vol. (kg/m <sup>3</sup> )		T (C°)	
				Temps (min)							
				10	30	10	30	10	30	10	30
0,55	Témoin	72	0	170	145	8,4	8,2	2187	2190	25,3	25,2
	20% CVK 4	50	0,082	175	140	8,4	8,1	2158	2227	25,6	26,5
0,4	Témoin	17	0,164	195	165	6,6	5,5	2289	2328	24,4	24,4
	20% CVK 4	87	0,292	210	70	7,2	4,5	2245	2366	26,0	27,0

\*Les quantités de SP totales sont données en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse du liant

Pour un rapport E/L=0,4, il est possible de constater que la demande en AEA est beaucoup plus importante en présence de CVK, même si plus de SP de type polycarboxylate a été utilisé, qui devrait lui aussi entraîner de l'air. Cela pourrait être expliqué par la perte au feu assez

élevée de la CVK, qui pourrait indiquer qu'elle a une plus forte teneur en carbone non brûlé. La grande porosité de ce carbone absorberait l'AEA, ce qui augmenterait les quantités nécessaires [Hill *et al.*, 1997]. Ces particules de carbone sont d'ailleurs observables à l'œil nu. De plus, entre 10 et 30 minutes, il y a une perte d'air et d'affaissement notable. Pour le rapport E/L=0,55, cet effet est moins évident, même que moins d'AEA a été requis comparativement au témoin. Cependant, cela pourrait être expliqué par le fait que de l'air supplémentaire a été entraîné par le SP. Les pertes d'affaissement des mélanges sont comparables à celles observées à la phase I-A, malgré le fait que les mélanges avec CVK semblent avoir une perte d'affaissement moins grande.

## 5.1 Résistance à la compression

Les valeurs des résistances à la compression sont données au Tableau 5.3 et sont illustrées à la Figure 5.1. Le témoin obtient des résistances presque toujours plus élevées, mais ce résultat est plus accentué pour E/L=0,4. En moyenne, le mélange avec 20% CVK 4 obtient 96 % du témoin pour E/L=0,55, tandis qu'il en obtient 58 % pour E/L=0,4. Cependant, ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que les échantillons avec CVK de E/L=0,4 ont été très difficiles à échantillonner, augmentant ainsi la porosité et diminuant possiblement les résistances. De plus, le témoin de E/L=0,55 n'a pas été fait à l'aide d'un SP, ce qui sous-estime peut-être ses résistances, puisqu'un SP aurait amélioré la dispersion des grains. Il est donc plus prudent de se fier aux résultats de E/L=0,4 dans ce cas-ci.

Il est aussi intéressant de noter que les résistances des CVK à 1 jour sont les meilleures par rapport au témoin, ce qui indique une activité plus importante à jeune âge. En effet, la résistance à 1 jour du témoin de rapport E/L=0,4 correspond à 46 % de la résistance atteinte à 1 an, tandis que cela correspond à 56 % pour le mélange avec CVK.

**Tableau 5.3 : Résistances à la compression des mélanges de la phase I-B**

E/C	Mélanges	Résistances à la compression, MPa (% du témoin)					
		1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	6 mois	1 an
0,55	Témoin	8,8	16,4	21,5	24,3	24,4	25,9
	20% CVK 4	9,2 (104)	16,0 (98)	20,3 (94)	21,6 (89)	23,4 (96)	25,2 (97)
0,4	Témoin	28,1	39,0	48,9	55,9	62,0	61,0
	20% CVK 4	18,8 (67)	22,7 (58)	25,5 (52)	32,8 (59)	34,8 (56)	33,3 (55)

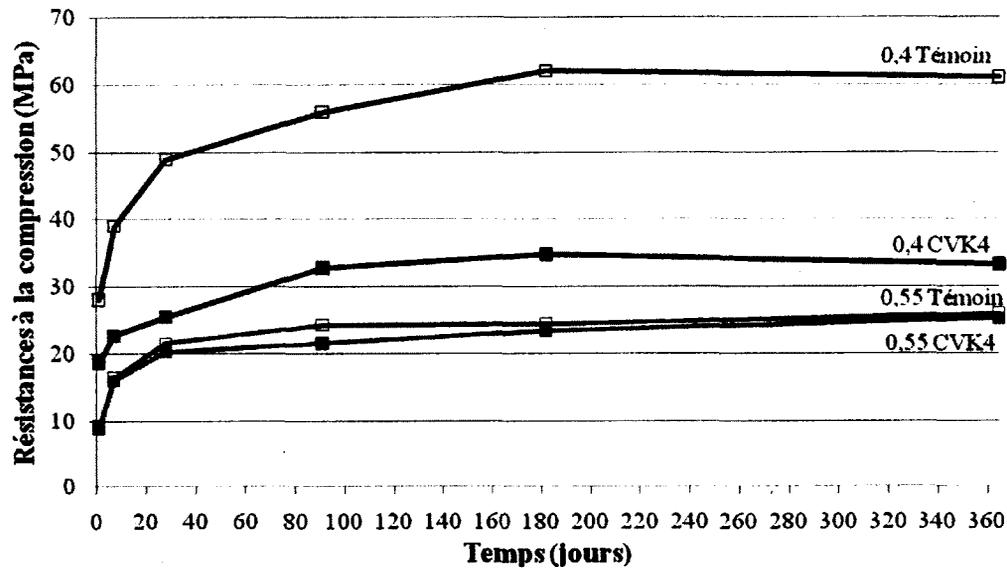


Figure 5.1 : Résistances à la compression des mélanges de la phase I-B

## 5.2 Perméabilité aux ions chlore

Tout d'abord, les niveaux de perméabilité en fonction de la charge en Coulombs sont présentés au Tableau 5.4. Ces valeurs nous indiquent si la perméabilité obtenue est considérée négligeable ou élevée.

Tableau 5.4 : Niveaux de perméabilité en fonction de la charge en Coulombs

Charge (Coulombs)	Perméabilité
> 4000	Élevée
2000 à 4000	Modérée
1000 à 2000	Basse
100 à 1000	Très basse
< 100	Négligeable

Selon la norme [ASTM C1202-09]

Les résultats des perméabilités aux ions chlore à 28 et 91 jours sont donnés au Tableau 5.5 et illustrés à la Figure 5.2. Les mélanges avec 20 % de CVK 4 sont plus perméables que les témoins, mais la différence entre les deux est moins grande à 91 jours qu'à 28 jours. Pour un  $E/L=0,55$ , le mélange avec CVK obtient une perméabilité 17 % plus élevée que le témoin à 28 jours. Cette perméabilité est 16 % plus élevée à 91 jours. Pour un  $E/L=0,4$ , le mélange avec CVK obtient une perméabilité 35 % plus élevée que le témoin à 28 jours. Cette perméabilité est seulement 22 % plus élevée à 91 jours. Il y a donc une certaine tendance d'amélioration de

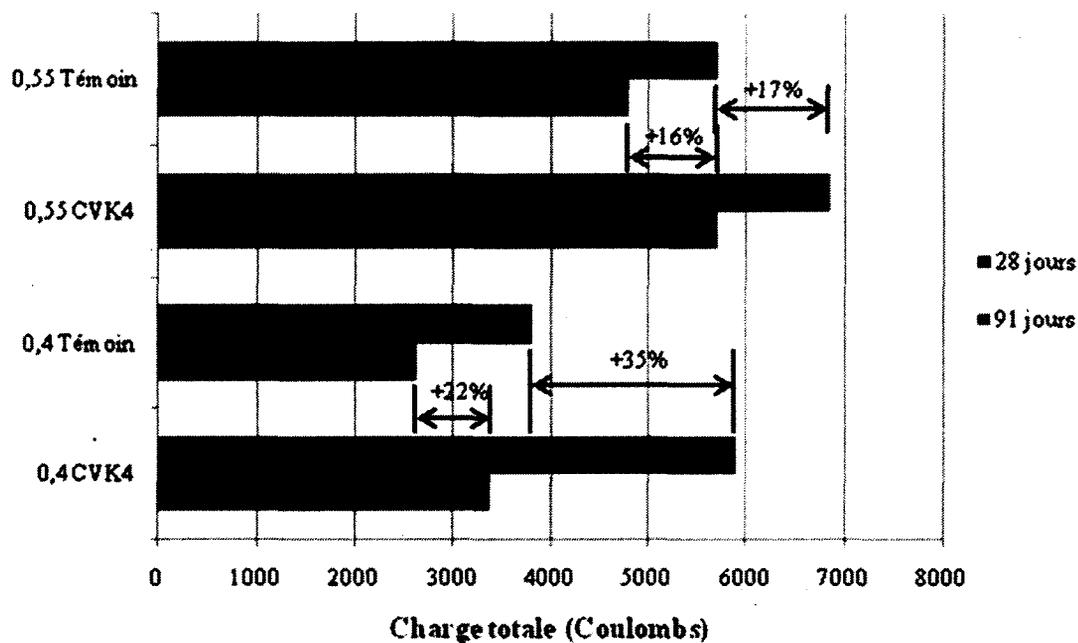
la perméabilité des mélanges avec CVK dans le temps. Contrairement aux résistances à la compression, les CVK ont tendance à améliorer leur perméabilité à plus long terme comparativement au témoin.

Tout comme mentionné auparavant, le mélange avec CVK pour un E/L=0,4 a été difficile à échantillonner. Cela pourrait expliquer que sa perméabilité soit plus loin du témoin que le mélange à E/L=0,55.

Tous les mélanges de rapport E/L=0,55 ont une perméabilité élevée, autant à 28 qu'à 91 jours. Pour un E/L=0,4, les mélanges ont une perméabilité modérée, à l'exception du mélange avec CVK à 28 jours.

**Tableau 5.5 : Perméabilité aux ions chlorés des mélanges de la phase I-B**

E/C	Mélanges	Charge totale (Coulombs)	
		28 jours	91 jours
0,55	Témoin	5697	4801
	20% CVK 4	6847	5704
0,4	Témoin	3813	2637
	20% CVK 4	5889	3379



**Figure 5.2 : Perméabilité aux ions chlorés de la phase I-B**

### 5.3 Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation a aussi été mesurée pour tous les mélanges. Le mélange confectionné était échantillonné dans un cylindre de 150 mm de diamètre par 300 mm de hauteur. Ce dernier était placé à l'intérieur d'une isolation thermique environ 60 minutes après le contact entre l'eau de gâchage et le liant. Deux capteurs enregistraient les températures à chaque période de 15 minutes et une moyenne entre les deux capteurs a été faite.

Il est à noter que toutes les courbes ont été corrigées afin qu'elles coupent l'axe horizontal au même endroit, dans ce cas-ci à zéro degré. C'est donc pourquoi il s'agit plutôt d'un gain de température plutôt que de la température elle-même sur l'axe des ordonnées.

La Figure 5.3 montre que les mélanges à  $E/L=0,4$  dégagent plus de chaleur d'hydratation que les mélanges à  $E/L=0,55$ , ce qui est normal a priori, puisque la compacité des grains est plus grande pour des mélanges à faible  $E/L$  et puisqu'il y a plus de liant dans la formulation des bétons de  $E/L=0,4$ . Mais il n'est pas encore possible de dire si les mélanges avec CVK ont tendance à dégager plus de chaleur que le témoin, puisque pour un  $E/L=0,4$  ils ont une plus faible chaleur d'hydratation, tandis qu'à  $E/L=0,55$ , ils ont une chaleur légèrement plus élevée. Il est cependant possible de constater que les courbes de chaleur des mélanges avec CVK sont plus décalées vers la gauche, ce qui indique une accélération des réactions avec les CVK. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette accélération de la chaleur d'hydratation : la grande finesse de la CVK 4 fait en sorte que plus de surface est disponible pour réagir rapidement, l'hydratation du ciment est accélérée par effet de dilution et la chaux libre présente dans la CVK 4 réagit probablement rapidement pour former de la chaux hydratée.

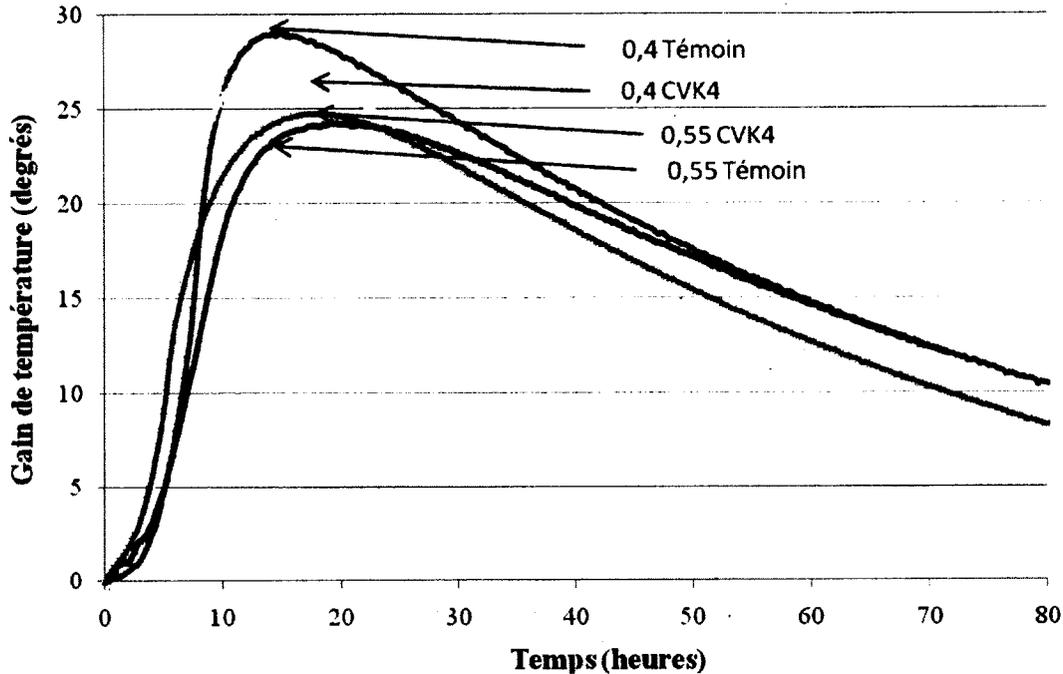


Figure 5.3 : Chaleur d'hydratation des mélanges de la phase I-B

## 5.4 Conclusions

À la suite de cette phase, il est possible de dire que la CVK 4 développe moins de résistances à la compression et est plus perméable qu'un témoin. Pour un rapport E/L de 0,4, le mélange avec CVK obtient une résistance moyenne de 58 % du témoin et une perméabilité entre 22 et 35 % plus élevée que le témoin. Cependant, les perméabilités se rapprochent du témoin à plus long terme, tandis qu'il semble y avoir une certaine activité à jeune âge observable avec les résistances à la compression et la chaleur d'hydratation. Finalement, la consommation en SP est plus élevée qu'un témoin et il y aurait une certaine attention à porter à l'entraînement de l'air, qui semble plus difficile à obtenir et à maintenir.

# CHAPITRE 6

## RÉSULTATS DE LA PHASE I – C :

### Comparaison des CVK

Cette dernière partie de la phase I a été entreprise afin de comparer toutes les CVK reçues à taux de remplacement égal, soit 20 %. Au total, six différentes CVK ont été testées numérotées entre 1 et 6. Les dates de production correspondantes sont disponibles au Tableau 3.8. À des fins de comparaisons, des essais ont aussi été faits avec des CVC et des CVF. Les deux mêmes rapports E/L que les deux autres phases ont été testés, soit 0,55 et 0,4. La composition des mélanges effectués est présentée au Tableau 6.1. Le Plastol 5000 a été utilisé comme SP.

Tableau 6.1 : Composition des mélanges de la phase I-C

E/L	Mélanges	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)*
0,55	Témoin	350	-	760	1070	0
	20% CVC	280	70	752	1070	0
	20% CVF	280	70	752	1070	0
	20% CVK 1	280	70	748	1070	0,152
	20% CVK 2	280	70	746	1070	0,090
	20% CVK 3	280	70	744	1070	0,090
	20% CVK 4	280	70	752	1070	0,105
0,4	Témoin	400	-	802	1070	0,202
	20% CVC	320	80	794	1070	0,174
	20% CVF	320	80	794	1070	0,177
	20% CVK 1	320	80	787	1070	0,502
	20% CVK 2	320	80	786	1070	0,291
	20% CVK 3	320	80	784	1070	0,285
	20% CVK 4	320	80	792	1070	0,360
	20% CVK 5	320	80	796	1070	0,241
20% CVK 6	320	80	790	1070	0,218	

Note : Les formulations corrigées en fonction des masses volumiques réelles sont présentées à l'Annexe A

\*Les quantités de SP totales sont données en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse du liant

## 6.1 Mélanges de rapport E/L de 0,55

Le Tableau 6.2 présente les données à l'état frais des mélanges effectués avec les différentes CVK. Les valeurs d'affaissement visées étaient de 150 mm à 10 minutes et 80 mm à 60 minutes. Du SP a été utilisé pour les mélanges avec CVK, tandis qu'aucun SP n'a été utilisé pour le témoin et les mélanges avec CVN. Les mélanges avec CVN montraient un affaissement supérieur au critère, mais comme il n'y avait pas de SP, ces valeurs minimales ont été gardées. Lorsque nécessaire, certains mélanges se voyaient ajouter du SP à 60 minutes afin d'ajuster leur affaissement.

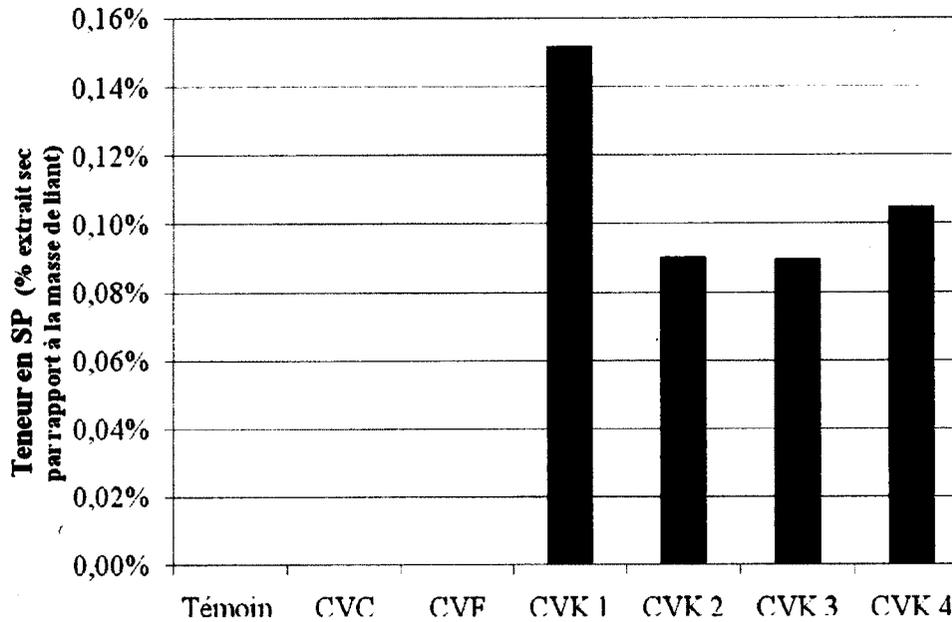
**Tableau 6.2 : Données à l'état frais des mélanges de la phase I-C (E/L=0,55)**

Mélanges	Affaissement (mm)				Air (%)		M. Vol. (kg/m <sup>3</sup> )		Température (C°)	
	Temps (min)									
	10	30	60	60+*	10	60	10	60	10	60
Témoin	145	120	75	-	1,0	1,1	2397	2396	22,8	22,8
20% CVC	135	140	135	-	0,9	0,9	2386	2391	22,1	22,0
20% CVF	175	140	120	-	0,8	0,7	2387	2407	23,9	23,8
20% CVK 1	160	100	45	70	2,3	1,9	2346	2357	25,5	25,6
20% CVK 2	130	130	90	-	1,5	1,6	2386	2362	24,1	24,2
20% CVK 3	140	130	75	-	1,9	1,9	2357	2381	24,7	24,7
20% CVK 4	155	125	75	-	1,9	1,7	2369	2388	24,5	24,7

\*Valeur obtenue après ajout de SP à 60 minutes

### 6.1.1 Propriétés à l'état frais

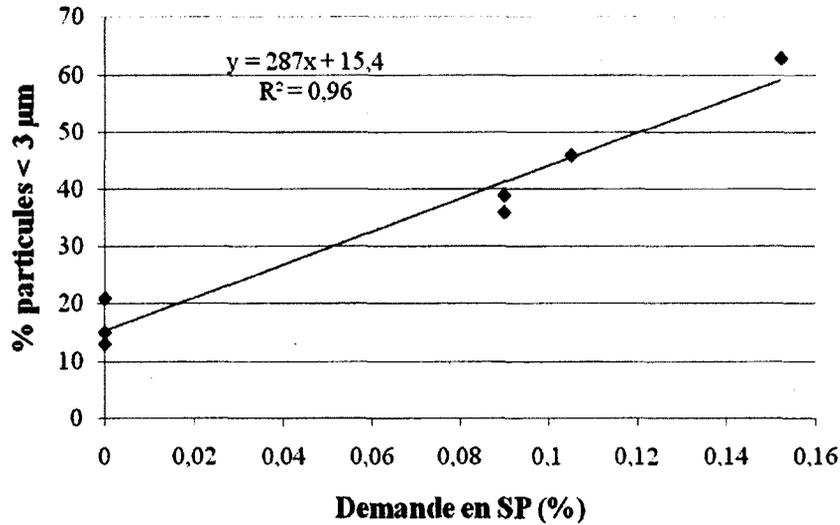
La Figure 6.1 illustre la demande en SP pour tous les mélanges de rapport E/L=0,55. Toutes les CVK demandent plus de SP que le témoin ou les CVN. La CVK 1 a une demande en SP particulièrement élevée.



**Figure 6.1 : Demande en SP des mélanges de la phase I-C (E/L=0,55)**

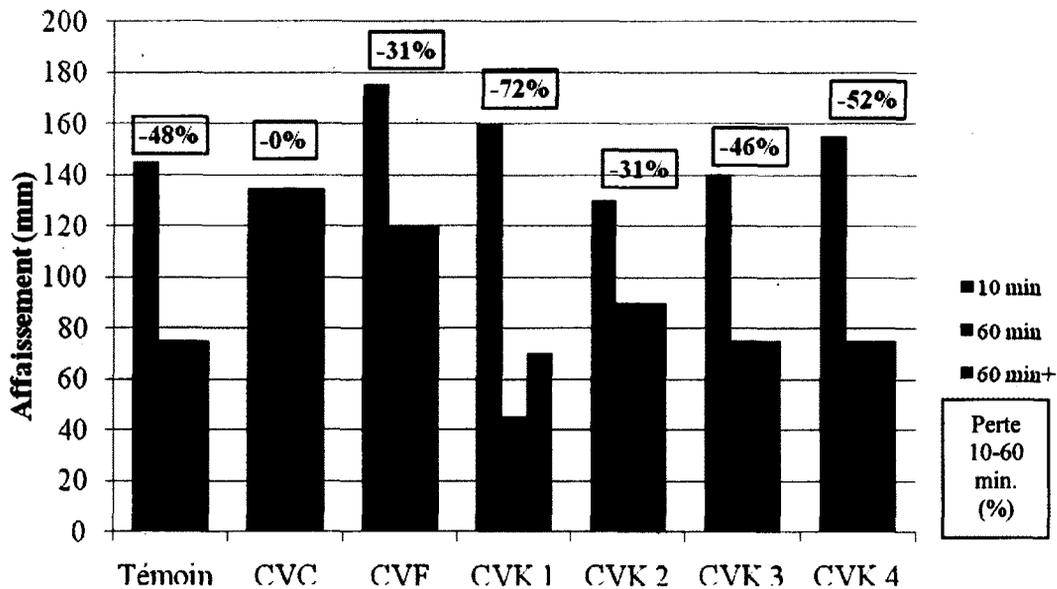
Le bon affaissement des CVN peut être expliqué en partie par leur forme sphérique et leur surface vitreuse, qui aident à l'écoulement, contrairement aux CVK, qui ont une surface irrégulière [Xie, 2009]. De plus, les CVK ont une finesse Blaine généralement très grande par rapport au ciment ou aux CVN, ce qui peut expliquer qu'elles aient une consommation en SP plus élevée, car il y a plus de surface spécifique à couvrir. De plus, les pertes au feu des CVK sont assez élevées, ce qui pourrait indiquer qu'elles ont une plus forte teneur en carbone non brûlé. Cette forte teneur en carbone pourrait augmenter la demande en SP étant donné leur grande porosité.

Cependant, il y a une relation plus marquée entre le pourcentage de particules inférieures à 3  $\mu\text{m}$  et la demande en SP. Cette relation est illustrée à la Figure 6.2. Elle montre que plus la CVK utilisée a de particules inférieures à 3  $\mu\text{m}$ , plus le mélange consomme de SP, et ce, de façon linéaire.



**Figure 6.2 : Relation entre la demande en SP et le % particules < 3μm (E/L=0,55)**

L'évolution de l'affaissement en fonction du temps est présentée à la Figure 6.3. La perte d'affaissement entre 10 et 60 minutes avant correction est affichée dans l'encadrée pour chaque mélange. Non seulement la CVK 1 a-t-elle une demande en SP élevée, mais elle perd son affaissement très rapidement. Entre l'essai à 10 et 60 minutes, elle a perdu 115 mm. Les autres CVK perdent aussi leur affaissement, mais de façon moins importante. La CVK 4, testée dans les deux phases précédentes, obtient des résultats semblables à la phase I-B. Les CVN offrent une bonne rétention de l'affaissement.



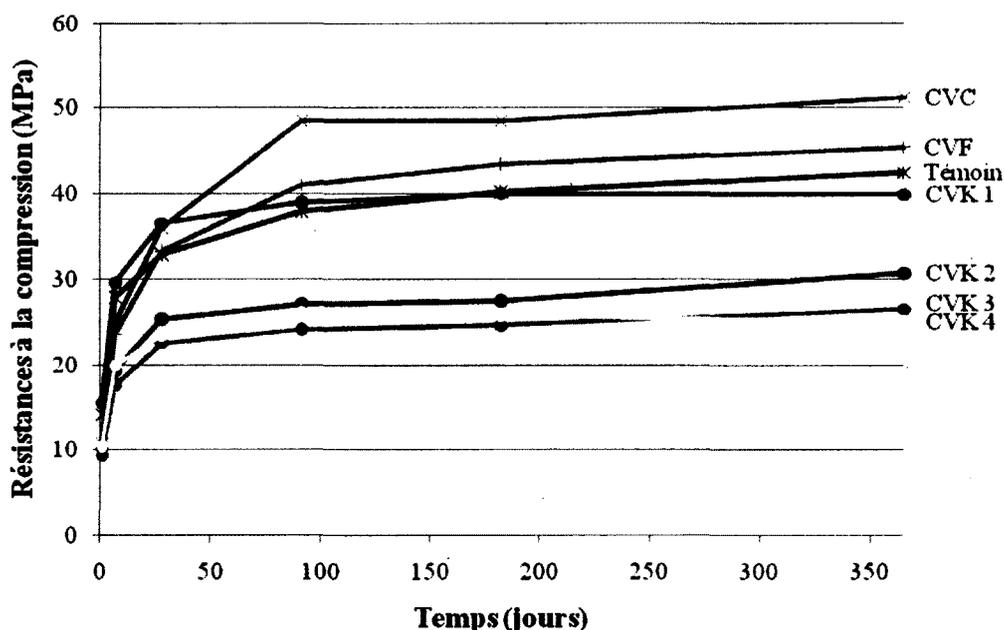
**Figure 6.3 : Évolution de l'affaissement dans le temps pour les mélanges de la phase I-C (E/L=0,55)**

## 6.1.2 Résistances à la compression

Les résistances à la compression obtenues sont données au Tableau 6.3 et sont illustrées à la Figure 6.4. Le témoin et les deux mélanges avec CVN obtiennent généralement de meilleures résistances que les CVK.

**Tableau 6.3 : Résistances à la compression des mélanges de la phase I-C (E/L=0,55)**

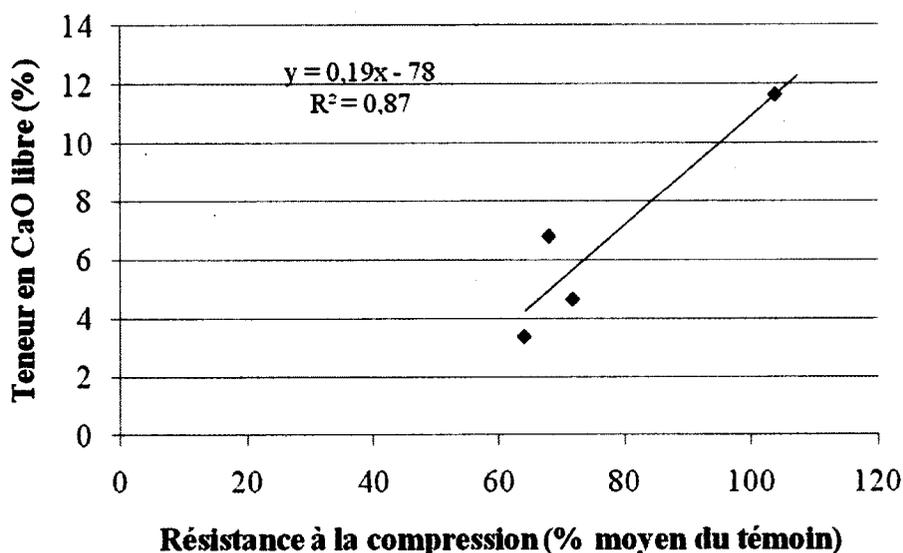
Mélanges	Résistances, MPa (% du témoin)					
	1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	6 mois	1 an
Témoin	14,1	27,9	32,9	37,9	40,2	42,5
20% CVC	10,7 (76)	25,0 (89)	36,0 (109)	48,5 (128)	48,5 (121)	51,2 (120)
20% CVF	11,1 (78)	23,5 (84)	33,3 (101)	41,0 (108)	43,5 (108)	45,4 (107)
20% CVK 1	15,5 (110)	29,6 (106)	36,5 (111)	39,0 (103)	40,0 (100)	39,9 (94)
20% CVK 2	10,3 (73)	19,3 (69)	25,3 (77)	27,1 (72)	27,5 (68)	30,7 (72)
20% CVK 3	9,4 (67)	17,6 (63)	22,5 (68)	24,1 (64)	24,6 (61)	26,5 (62)
20% CVK 4	10,5 (74)	19,9 (71)	23,4 (71)	26,2 (69)	25,7 (64)	25,1 (59)



**Figure 6.4 : Résistances à la compression des mélanges de la phase I-C (E/L=0,55)**

Cependant, la CVK 1 se démarque avec des résistances supérieures au témoin et aux deux CVN entre 1 et 28 jours. Sa grande finesse semble donc améliorer sa réactivité à jeune âge. Par contre, la CVK 4, qui a une finesse Blaine semblable, ne semble pas développer d'aussi fortes résistances. En effet, la relation entre les résistances est meilleure avec le pourcentage de particules entre 1 et 30  $\mu\text{m}$  plutôt que la finesse Blaine. Il existe aussi une relation entre les

résistances et la teneur totale en éléments principaux ( $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Donc, plus il y a de particules comprises entre 1 et 30  $\mu\text{m}$ , ou plus la cendre contient d'éléments principaux, meilleures sont ses résistances. Mais de façon plus étonnante, il existe une bonne relation avec la teneur en CaO libre. La Figure 6.5 illustre que plus il y a de CaO libre dans la cendre, plus les résistances sont élevées.



**Figure 6.5 : Relation entre la teneur en CaO libre des CVK et la résistance à la compression (Phase I-C, E/L=0,55)**

En général, le gain de résistance des CVK semble plafonner plus rapidement que le témoin ou les CVN. À 1 jour, le témoin, CVC et CVF ont atteint respectivement 33, 21 et 24 % de leur résistance à 1 an. L'hydratation plus lente des CVN est observable par leur faible pourcentage. Pour les CVK, c'est 39, 34, 35 et 42 % de leur résistance à 1 an qui est atteinte à 1 jour pour chacune des CVK en ordre chronologique. Il y a donc une activité plus importante à jeune âge pour ces cendres. Ces résultats sont très similaires à ceux obtenus lors de la phase I-B pour le témoin et le mélange avec la CVK 4.

Il est cependant important de noter que les mélanges témoin, CVC et CVF n'ont pas eu de SP, ce qui aurait probablement augmenté leur résistance grâce à une meilleure dispersion des particules. Ces tendances devront donc être validées avec les mélanges de rapport E/L=0,4.

Par ailleurs, lors du démoulage des échantillons contenant la CVK 3, un léger gonflement est apparent. En effet, un soulèvement du béton plus haut que le bord du cylindre est visible à l'œil nu au moment de démouler.

### 6.1.3 Perméabilités aux ions chlore

Les perméabilités aux ions chlore obtenues à 28 et 91 jours sont données au Tableau 6.4 et sont illustrées à la Figure 6.6. Grâce à leur bonne compacité, les CVN densifient la matrice cimentaire et abaissent la perméabilité d'une façon considérable. En ce qui a trait aux mélanges avec les CVK, elles ont une perméabilité légèrement supérieure au témoin à 28 jours, mais les résultats à 91 jours sont plus favorables, étant même équivalents ou meilleurs que le témoin. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus à la phase I-B, qui indiquaient que les perméabilités des CVK étaient meilleures à 91 jours. En effet, les cendres abaissent leur perméabilité de 30 à 43 % entre 28 et 91 jours, comparativement à 11 % pour le témoin. Les CVN les abaissent de façon encore plus importante, mais cela est probablement attribué à leur hydratation qui se fait à plus long terme et qui aide à abaisser les perméabilités à 91 jours. Il existe donc un autre phénomène qui fait en sorte que les mélanges avec CVK sont favorisés à long terme comparativement au témoin.

**Tableau 6.4 : Perméabilités aux ions chlore des mélanges de la phase I-C (E/L=0,55)**

Mélanges	Charge totale (Coulombs)	
	28 jours	91 jours
Témoin	5399	4786
20% CVC	2030	676
20% CVF	3565	1129
20% CVK 1	6859	4828
20% CVK 2	6297	3600
20% CVK 3	6284	3778
20% CVK 4	7168	4925

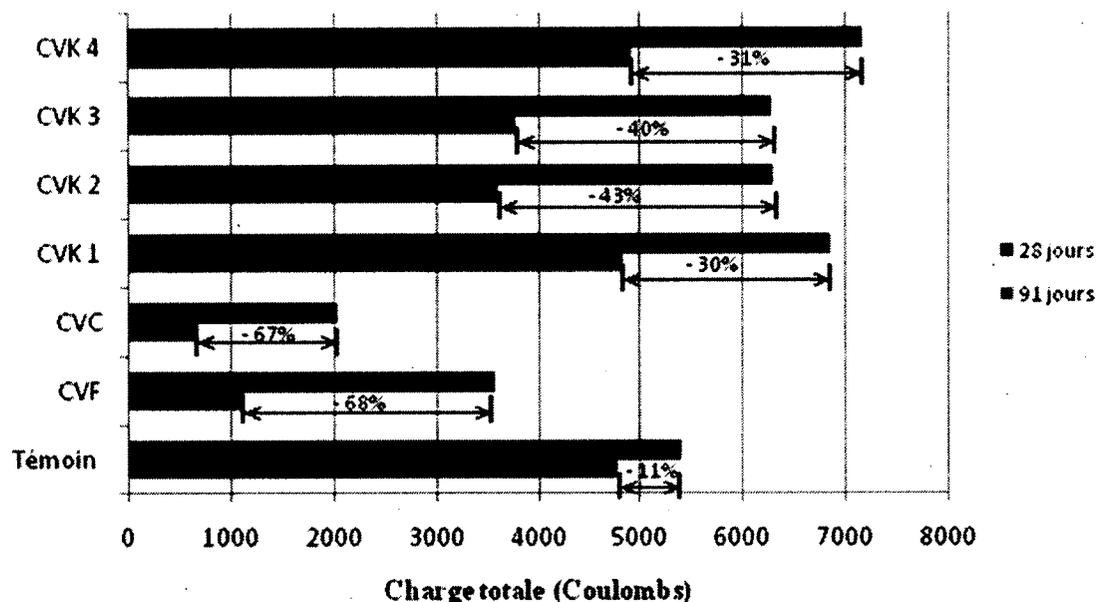


Figure 6.6 : Perméabilités aux ions chlore de la phase I-C (E/L=0,55)

## 6.2 Mélanges de rapport E/L de 0,4

Le Tableau 6.5 présente les données à l'état frais des mélanges. Les valeurs d'affaissement visées étaient de 210 mm à 10 minutes et 150 mm à 60 minutes. Lorsque nécessaire, certains mélanges se voyaient ajouter du SP afin d'ajuster leur affaissement à 60 minutes.

Tableau 6.5 : Données à l'état frais des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)

Mélanges	Affaissement (mm)				Air (%)		M. Vol. (kg/m <sup>3</sup> )		Température (C°)	
	Temps (min)									
	10	30	60	60+*	10	60	10	60	10	60
Témoin	215	195	175	-	1,5	1,7	2435	2448	24,6	24,3
20% CVC	210	200	155	-	1,5	1,6	2406	2424	21,7	21,7
20% CVF	200	150	90	150	1,7	-	2427	-	21,5	-
20% CVK 1	230	175	60	160	0,9	1,2	2423	2431	23,9	-
20% CVK 2	200	180	50	150	1,5	1,4	2435	2432	24,2	24,1
20% CVK 3	225	190	55	160	1,1	1,3	2434	2440	22,9	23,5
20% CVK 4	235	205	50	170	1,5	-	2472	-	21,0	-
20% CVK 5	210	110	50	190	-	1,6	2442	2468	19,5	20,0
20% CVK 6	215	205	140	175	1,4	-	2434	-	21,0	22,0

\*Valeurs obtenues après ajout de SP à 60 minutes

## 6.2.1 Propriétés à l'état frais

La Figure 6.7 illustre la demande en SP pour tous les mélanges de rapport E/L=0,4. La bande initiale illustre la demande en SP à 10 minutes tandis que la bande totale illustre la demande en SP totale après ajout de SP à 60 minutes lorsque requis. Toutes les CVK demandent plus de SP que le témoin ou les CVN. Les résultats concordent avec ceux trouvés avec les mélanges de E/L=0,55. Deux autres CVK s'ajoutent aux essais et elles montrent une faible consommation en SP par rapport aux autres.

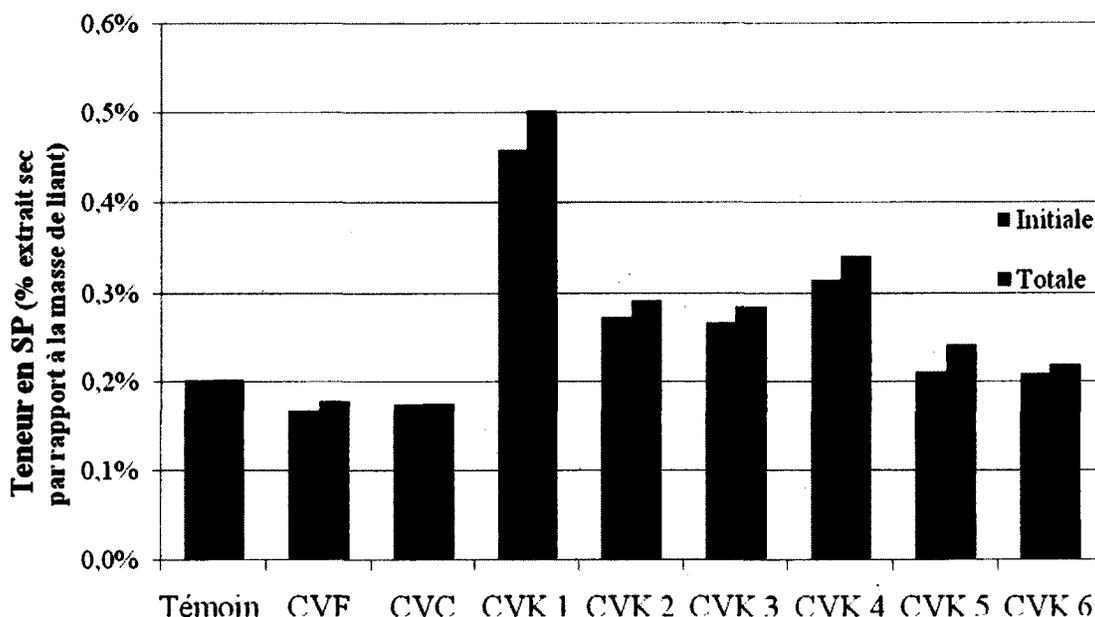
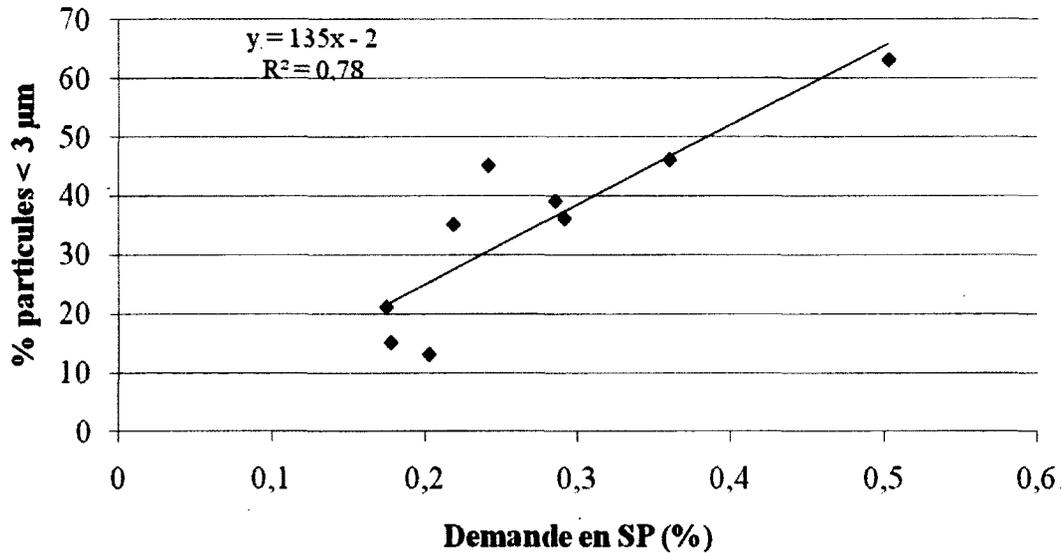


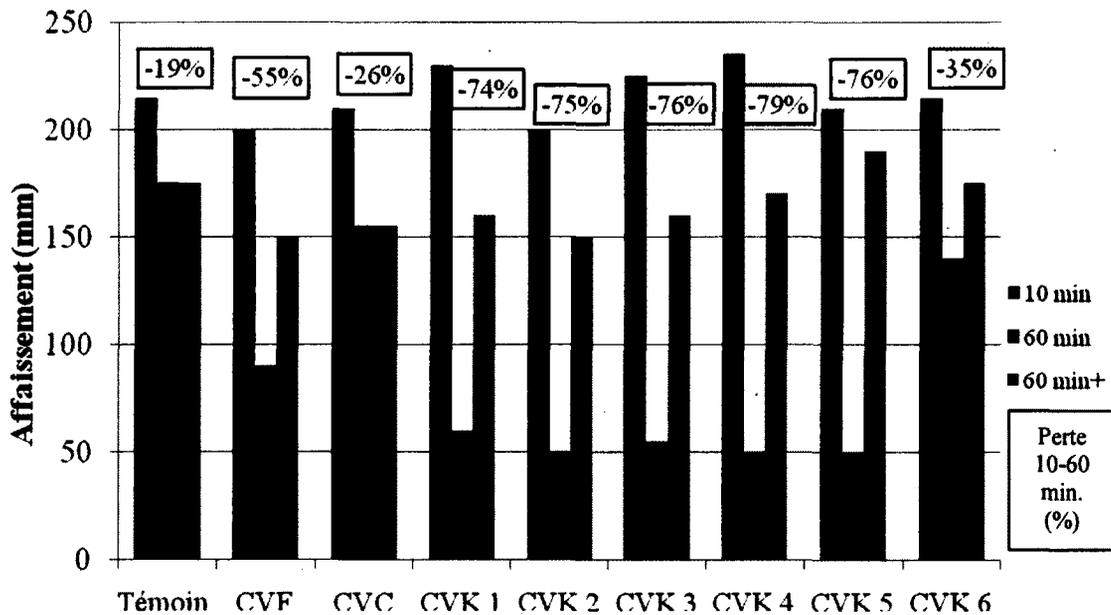
Figure 6.7 : Demande en SP des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)

Comme précédemment, les CVN ont une plus grande facilité à avoir et garder un bon affaissement. Tout comme les E/L=0,55, la demande en SP augmente avec le pourcentage de particules inférieures à 3  $\mu\text{m}$ , tel qu'illustré à la Figure 6.8.



**Figure 6.8 : Relation entre la demande en SP et le % particules < 3μm (E/L=0,4)**

L'évolution de l'affaissement en fonction du temps est présentée à la Figure 6.9. La perte d'affaissement entre 10 et 60 minutes avant correction est affichée dans l'encadrée pour chaque mélange. Toutes les CVK, à l'exception de la CVK 6, ont une perte d'affaissement importante. Contrairement au rapport E/L=0,55, la CVK 1 n'a pas une perte beaucoup plus élevée que les autres CVK. En fait, elles ont toutes une perte assez élevée.



**Figure 6.9 : Évolution de l'affaissement dans le temps pour les mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)**

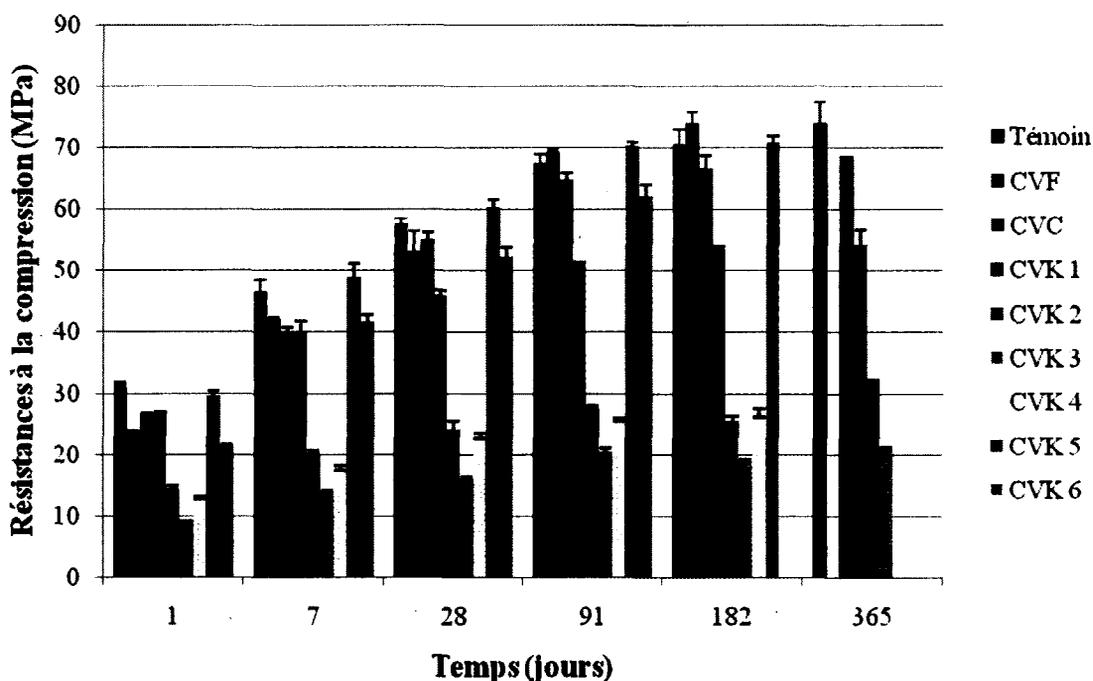
## 6.2.2 Résistances à la compression

Les résultats sont donnés au Tableau 6.6. La Figure 6.10 illustre l'évolution des résistances des mélanges en fonction du temps et la Figure 6.11 illustre ces mêmes résultats, mais en pourcentage par rapport au témoin. Une barre d'erreur correspondant à plus ou moins une fois l'écart type des 3 échantillons testés a été incluse pour chacune des résistances. Dans le cas des résistances exprimées en pourcentage du témoin, l'erreur relative de chacune des deux mesures a été additionnée.

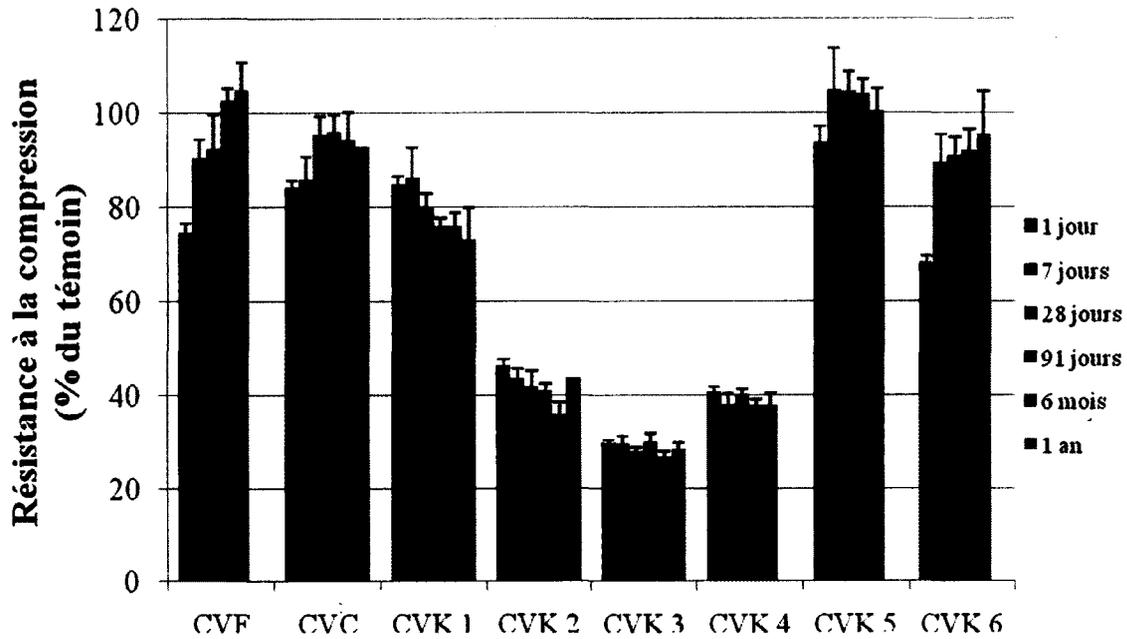
**Tableau 6.6 : Résistances à la compression des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)**

Mélanges	Résistances à la compression, MPa (% du témoin)					
	1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	6 mois	1 an*
Témoin	31,6	46,7	57,6	67,5	70,6	74,0
20% CVC	26,7 (84)	40,2 (86)	55,0 (95)	64,9 (96)	66,7 (94)	68,7 (93)
20% CVF	23,6 (75)	42,3 (91)	53,2 (92)	69,3 (103)	74,0 (105)	-
20% CVK 1	26,8 (85)	40,3 (86)	46,2 (80)	51,3 (76)	53,6 (76)	54,3 (73)
20% CVK 2	14,6 (46)	20,3 (43)	24,1 (42)	27,7 (41)	25,5 (36)	32,4 (44)
20% CVK 3	9,5 (30)	13,9 (30)	16,1 (28)	20,5 (30)	19,0 (27)	21,1 (29)
20% CVK 4	12,9 (41)	17,8 (38)	23,1 (40)	25,7 (38)	26,9 (38)	-
20% CVK 5	29,6 (94)	49,0 (105)	60,3 (105)	70,2 (104)	70,9 (100)	-
20% CVK 6	21,6 (68)	41,9 (90)	52,4 (91)	62,1 (92)	67,4 (95)	-

\*Certains résultats ne sont pas encore disponibles



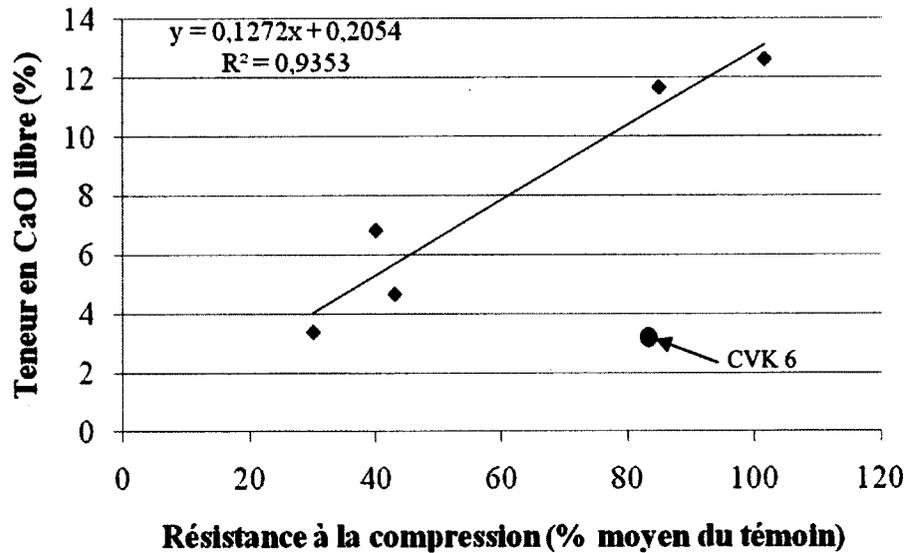
**Figure 6.10 : Résistances à la compression des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)**



**Figure 6.11 : Résistances à la compression par rapport au témoin des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)**

Les deux nouvelles cendres, CVK 5 et 6, montrent de très bonnes résistances, ainsi que la CVK 1. Ces mélanges obtiennent respectivement une moyenne de 102, 87 et 79 % du témoin. Les mélanges avec CVK 2, 3 et 4 obtiennent respectivement des résistances moyennes de 42 %, 29 % et 39 % du témoin. Les résistances des cendres par rapport au témoin sont plus faibles que pour les mélanges de E/L=0,55, mais cela est probablement dû au fait que le témoin de E/L=0,55 n'avait pas de SP. Il est tout de même possible de confirmer les performances des cendres en les comparant entre elles. Il est à noter que les résistances obtenues pour la CVK 4 lors de la phase I-B sont plus élevées. Il n'y a pas de raison évidente de ce changement, de l'ordre de 20 à 30 %.

Les relations entre la résistance et le pourcentage de particules entre 1 et 30  $\mu\text{m}$  ainsi que la teneur en CaO libre ne sont pas aussi bonnes que pour le rapport E/L=0,55. En fait, la meilleure relation se trouve entre les résistances et la teneur totale en éléments principaux. Cependant, les trois relations obtiennent un  $R^2$  de 0,3 à 0,7 environ, ce qui n'est pas nécessairement concluant. La relation avec la teneur en CaO serait très bonne si ce n'était de la CVK 6, qui diverge beaucoup de la relation. En enlevant cette dernière, il est possible d'observer à la Figure 6.12 que plus il y a de CaO, meilleures sont les résistances.



**Figure 6.12 : Teneur en CaO libre des CVK en fonction de la résistance (E/L=0,4)**

Ici aussi, le gain de résistance des CVK semble plafonner plus rapidement que le témoin ou les CVN. À 1 jour, le témoin, CVC et CVF ont atteint respectivement 45, 40 et 32 % de leur résistance à 6 mois. L'hydratation plus lente des CVN est observable par leur faible pourcentage. Pour les CVK, c'est 50, 57, 50, 48, 42 et 32 % de leur résistance à 6 mois qui est atteinte à 1 jour pour chacune des CVK en ordre chronologique. Il y a donc une activité plus importante à jeune âge, mais surtout pour les trois premières CVK. La CVK 6 semble être différente des autres dans plusieurs aspects. En effet, il est probable que l'absence de très fines particules dans cette cendre limite son activité à jeune âge.

Il est à noter que la CVK 3 montre de forts gonflements et des microfissures lors du démoulage après 24 heures. La CVK 2 montre aussi des gonflements et des microfissures, mais pas autant que la CVK 2. Enfin, la CVK 4 montre quelques signes de gonflement et de microfissures, mais moins que les deux CVK précédentes. Des photos de cas de gonflements et de microfissures seront présentées au chapitre 7.

### 6.2.3 Perméabilités aux ions chlore

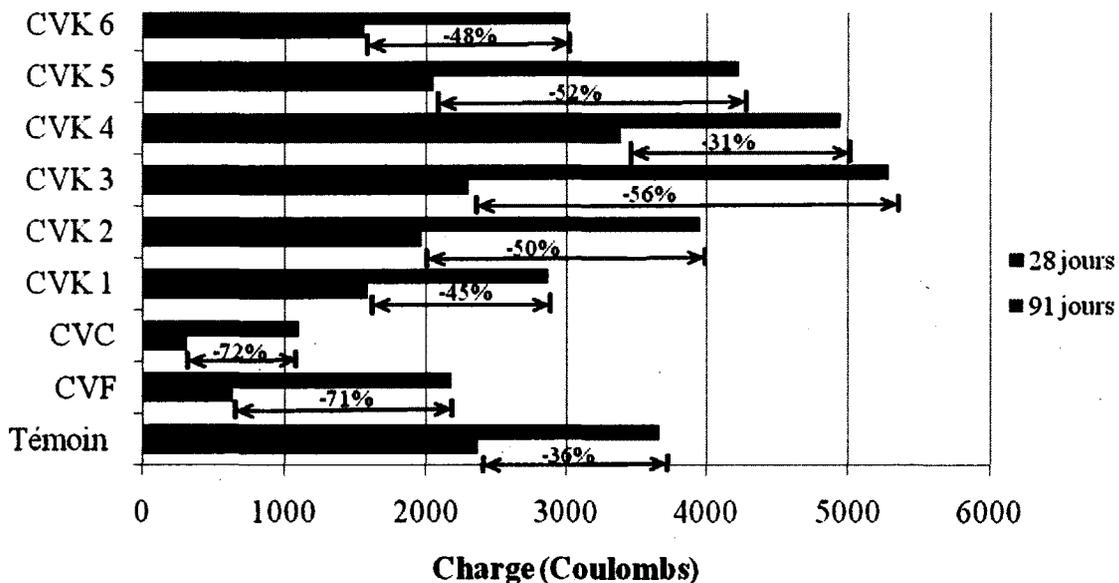
Les perméabilités aux ions chlore obtenues à 28 et 91 jours sont données au Tableau 6.7 et illustrées à la Figure 6.13. Les CVN abaissent toujours la perméabilité de façon considérable.

Pour les CVK, la plupart ont des perméabilités supérieures au témoin à 28 jours, mais à 91 jours, elles sont équivalentes ou sous le témoin, à l'exception de la CVK 4.

Ces résultats confirment les tendances observées avec les mélanges de rapport E/L=0,55 ainsi que la phase I-B. Les CVK abaissent leur perméabilité entre 31 et 56 % entre 28 et 91 jours, comparativement à 36 % pour le témoin. Seulement la cendre Avril 2009 est sous le témoin.

**Tableau 6.7 : Perméabilités aux ions chlore des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)**

Mélanges	Perméabilités (Coulombs)	
	28 jours	91 jours
Témoin	3665	2363
20% CVC	1098	312
20% CVF	2173	635
20% CVK 1	2860	1584
20% CVK 2	3953	1964
20% CVK 3	5279	2304
20% CVK 4	4934	3390
20% CVK 5	4224	2046
20% CVK 6	3016	1562



**Figure 6.13 : Perméabilités aux ions chlore de la phase I-C (E/L=0,4)**

## 6.2.4 Temps de prise

Les temps de prise ont été mesurés sur les mélanges de rapport  $E/L=0,4$  seulement. Les pressions mesurées en fonction du temps sont présentées à la Figure 6.14. À la Figure 6.15, les moments de début de prise (correspondant à une pression de 500 psi) et de fin de prise (correspondant à une pression de 4000 psi) ont été calculés et présentés en histogramme. Les mélanges sont classés en ordre décroissant du moment de fin de prise. L'essai ne semble pas donner une bonne répétitivité, puisqu'il dépend grandement de manipulations humaines. Cependant, les tendances semblent justes.

Le témoin est le mélange terminant sa prise le plus tôt. La prise (moment entre le début et la fin de la prise) dure entre 1,2 et 1,9 heure pour tous les mélanges. Ceux qui terminent leur prise plus tard sont généralement ceux qui l'ont commencée plus tard aussi. Les prises débutent après 4,4 à 5,9 heures et se terminent après 5,6 à 7,4 heures.

Mis à part une tendance générale de léger retard dans la prise, les CVK ne semblent pas avoir de problèmes ou de différences majeurs en comparaison avec le témoin et les CVN.

Ce retard contredit les recherches publiées précédemment, qui indiquent que les CVA de l'industrie des pâtes et papiers accélèrent les temps de prise [Kinuthia *et al.*, 2001, O'Farrell *et al.*, 2002, Bai *et al.*, 2003, Chaipanich *et al.*, 2005, Garcia *et al.*, 2008, Frias *et al.*, 2008b et Vegas *et al.*, 2009b]. Cependant, dans le cas présent, il est possible que les lectures ne soient pas assez précises pour confirmer les tendances, puisque l'essai de temps de prise est dépendant de plusieurs manipulations humaines. Il est possible de constater que les répétitions effectuées montrent des résultats légèrement différents.

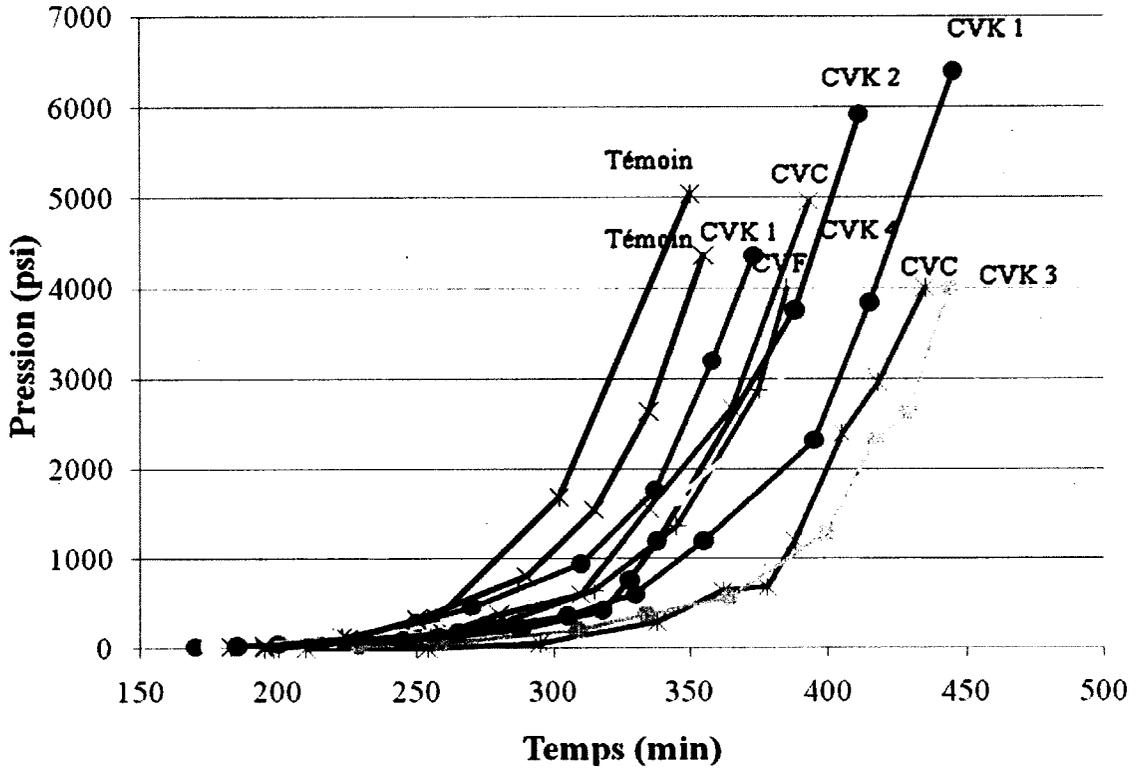


Figure 6.14 : Temps de prise des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)

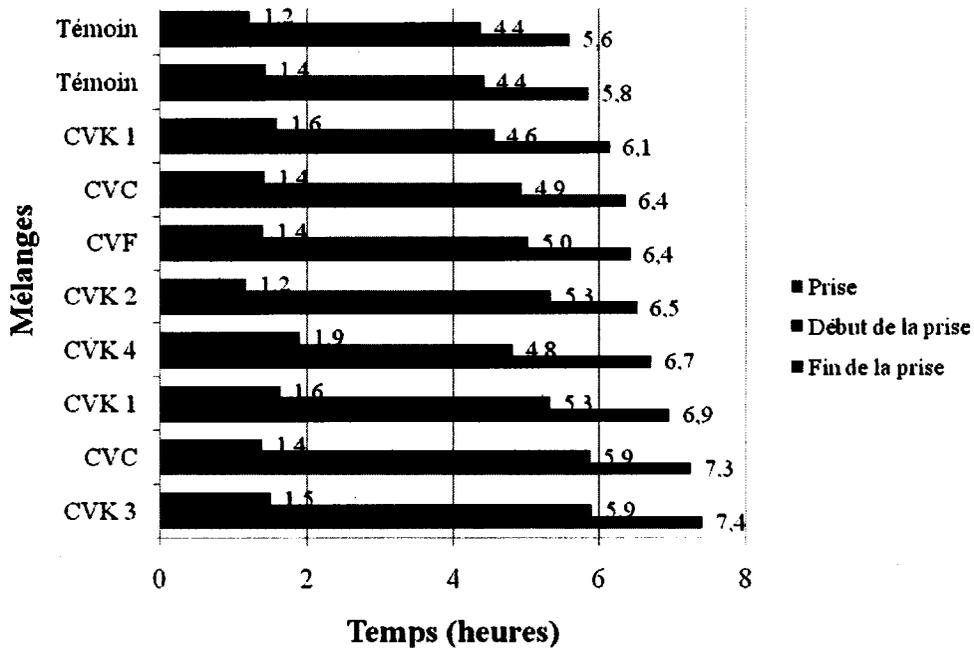


Figure 6.15 : Prise des mélanges de la phase I-C (E/L=0,4)

### **6.3 Correspondance avec la norme CSA A3004-E1**

Afin d'avoir une idée sur la performance des CVK comme ACA, il est essentiel de vérifier si ces performances satisfont aux exigences de la norme CSA sur les ACA [CSA, 2008a]. À cet effet, le Tableau 6.8 présente les exigences de la norme. Dans ce rapport, seulement les exigences pour un rapport  $E/L=0,4$  sont présentées, mais il existe aussi des exigences pour des rapports  $E/L=0,5$  et  $0,7$ .

Il est important de noter que les mélanges de la norme doivent contenir entre 5 % et 8 % d'air entraîné, contrairement aux mélanges de la phase I-C, qui n'ont pas été confectionné avec de l'air entraîné. Comme les exigences de la norme sont en pourcentage par rapport au témoin, il est tout de même possible de faire une comparaison. Cependant, les comparaisons faites ici sont seulement à titre provisoire, afin d'avoir une première idée.

Jusqu'à maintenant, les CVK 5 et 6 rencontrent les exigences de la norme CSA A3004-E1 pour le type d'ACA B.

**Tableau 6.8 : Spécifications et exigences pour les essais sur bétons (selon la norme CSA A3004-E1)**

		Béton de classe I E/L = 0,40 ± 0,02 Entre 5 et 8% d'air		CVK 1	CVK 5	CVK 6
		Type d'ACA				
<b>Exigences</b>		A	B	B	B	B
<b>Résistance, à différents âges</b>						
3 jours		≥ 85% du témoin	-			
28 jours		≥ 90% du témoin	≥ 75% du témoin	80%	105%	91%
90 jours		≥ 95% du témoin	≥ 85% du témoin	76%	104%	92%
1 an		≥ résistance 90 jours		oui	À venir	À venir
3 ans		≥ résistance 1 an		N/D	N/D	N/D
<b>Durabilité</b>						
Résistance aux cycles de gel/dégel		Facteur de durabilité ≥ 80%		N/D	N/D	N/D
Résistance à l'écaillage		Pas de limite, mais doit être indiqué		N/D	N/D	N/D
Perméabilité aux ions chlore à 56 jours		< témoin	-			
Perméabilité aux ions chlore à 91 jours		< témoin	< témoin	< témoin	< témoin	< témoin
<b>Autres</b>						
Temps de prise		Pas plus de 1:00 plus tôt ou 1:30 plus tard		0:82 plus tard	N/D	N/D
Retrait de séchage		≤ 120% du témoin		N/D	N/D	N/D

## 6.4 Conclusions

Cette phase révèle que les CVK ont en général une demande en SP plus importante qu'un témoin ou que les CVN. Cette demande semble être reliée au pourcentage de particules inférieures à 3 µm. La teneur en carbone non brûlé ainsi que la surface irrégulière des particules contribuent probablement aussi à cette forte demande.

Certaines des CVK montrent de faibles résistances par rapport au témoin (entre 30 et 45 % du témoin), tandis que d'autres performant mieux (entre 80 et 105 % du témoin). Il n'est cependant pas encore possible de déterminer la cause exacte de ces différentes performances. La teneur en CaO, SiO<sub>2</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, et la granulométrie jouent certainement un rôle, mais ne peuvent expliquer à elles seules les résultats. De façon plus étonnante, la teneur en CaO libre

semble avoir un effet positif. Cependant, il n'y a aucun doute sur la plus grande activité à jeune âge des CVK, autant par leur résistance à 1 jour que par leur dégagement de chaleur d'hydratation plus rapide.

Les CVK obtiennent en général des perméabilités équivalentes ou meilleures que le témoin à 91 jours, contrairement à 28 jours, où les CVK performant moins bien. Il y a donc un autre phénomène qui permet aux CVK de développer de meilleures perméabilités à long terme, même si tout porte à croire qu'elles ont plutôt une meilleure activité à jeune âge.

Au niveau des temps de prise, les CVK accusent un léger retard, mais rien de très prononcé. Ces résultats sont en contradiction avec l'accélération du dégagement de la chaleur d'hydratation.

De bonnes perspectives sont à prévoir pour rencontrer les exigences de la norme CSA A3004-E1, puisque les résultats des bétons sans air entraînée de certaines CVK respectent les exigences. Tout porte à croire que ces bétons, une fois un AEA ajouté, obtiendront des résultats similaires.

Finalement, quelques gonflements et microfissures sont apparents sur quelques échantillons. Ces gonflements sont parfois faibles, mais parfois assez importants. Il n'est pas possible pour le moment de dire quels sont les conséquences de tels gonflements.



# CHAPITRE 7

## RÉSULTATS DE LA PHASE II :

### Compatibilité avec les superplastifiants

Lors de travaux précédents [Xie, 2009], différents SP avaient été testés; Disal, Da19 sodium, Da19 calcium, Eucon 37 et Plastol 5000. Le Disal et le Da19 (sodium et calcium) sont à base de polynaphtalène sulfonate (PNS), tandis que l'Eucon 37 est un réducteur d'eau. Seul le Plastol 5000 est à base de polycarboxylate. C'est d'ailleurs ce dernier qui avait été retenu grâce à ses bonnes résistances à la compression comparativement aux autres produits. Cependant, aucun autre SP de type polycarboxylate n'avait été testé. L'objectif de cette partie est donc de savoir si un autre SP de type polycarboxylate obtient de meilleurs résultats, ou si le Plastol 5000 reste le meilleur choix.

Les différents SP comparés sont; Plastol 5000, Viscocrete 2100, Adva 405 et Glenium 7102. Cette gamme, provenant de différentes compagnies, a été retenue afin d'avoir une bonne représentativité des produits sur le marché. Le Viscocrete est un SP d'usage général, tandis que le Glenium 7102 et Adva 405 devraient offrir une meilleure rétention de l'affaissement dans le temps. Le Plastol 5000 devrait augmenter les résistances initial et ultime des bétons. Seules les CVK 1 et 4 ont été testées avec tous les SP, à un taux de remplacement de 20 % du ciment. À cela s'ajoute un mélange témoin pour chacun des SP. Seulement le rapport E/L=0,4 a été testé. Le Tableau 7.1 présente la composition des mélanges effectués dans cette phase. Les données à l'état frais sont présentées dans le Tableau 7.2. Les valeurs d'affaissement visées étaient de 210 mm à 10 minutes et 150 mm à 60 minutes. Lorsque nécessaire, certains mélanges se voyaient ajouter du SP afin d'ajuster leur affaissement à 60 minutes.

**Tableau 7.1 : Composition des mélanges de la phase II**

SP	Mélanges	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)*
Plastol 5000	Témoin	400	-	802	1070	0,202
	20% CVK 1	320	80	787	1070	0,502
	20% CVK 4	320	80	792	1070	0,360
Viscocrete 2100	Témoin	400	-	802	1070	0,173
	20% CVK 1	320	80	788	1070	0,421
	20% CVK 4	320	80	792	1070	0,326
Adva 405	Témoin	400	-	802	1070	0,230
	20% CVK 1	320	80	787	1070	0,525
	20% CVK 4	320	80	791	1070	0,529
Glenium 7102	Témoin	400	-	801	1070	0,297
	20% CVK 1	320	80	786	1070	0,668
	20% CVK 4	320	80	790	1070	0,574

Note : Les formulations corrigées en fonction des masses volumiques réelles sont présentées à l'Annexe A  
 \*Les quantités de SP totales sont données en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse du liant

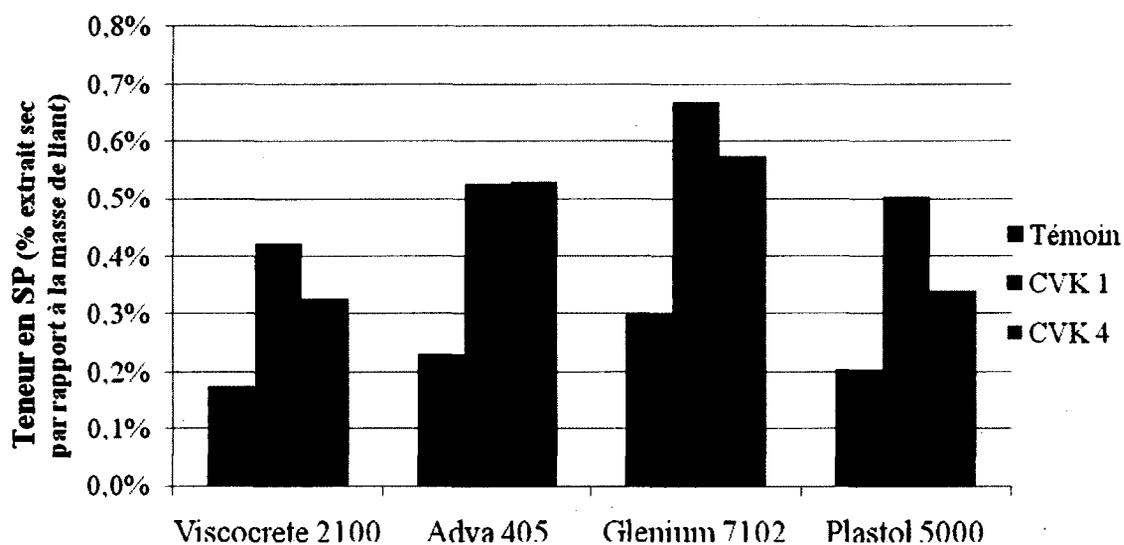
**Tableau 7.2 : Données à l'état frais des mélanges de la phase II**

SP	Mélanges	Affaissement (mm)				Air (%)		M. Vol. (kg/m <sup>3</sup> )		Température (C°)	
		Temps (min)									
		10	30	60	60+*	10	60	10	60	10	60
Plastol 5000	Témoin	215	195	175	-	1,5	1,7	2435	2448	24,6	24,3
	20% CVK 1	230	175	60	160	0,9	1,2	2423	2431	23,9	-
	20% CVK 4	235	205	50	170	1,5	-	2472	-	21,0	-
Viscocrete 2100	Témoin	200	155	90	165	1,5	1,5	2444	2443	22,7	22,6
	20% CVK 1	225	195	80	170	0,6	1,6	2422	2443	23,9	23,9
	20% CVK 4	235	220	150	-	0,9	1,6	2459	2464	21,1	22,1
Adva 405	Témoin	205	200	190	-	1,7	2,5	2435	2429	23,2	22,7
	20% CVK 1	210	175	105	160	1,1	1,6	2446	2442	-	-
	20% CVK 4	190	110	35	110	1,8	-	2439	2434	23,7	23,7
Glenium 7102	Témoin	180	190	165	-	1,4	1,2	2446	2459	21,3	21,0
	20% CVK 1	220	200	180	-	1,2	1,2	2446	2468	20,0	20,0
	20% CVK 4	220	210	190	-	1,1	1,3	2458	2467	20,0	21,0

\*Valeurs obtenues après ajout de SP à 60 minutes

## 7.1 Propriétés à l'état frais

La demande en SP de tous les mélanges de la phase II est illustrée à la Figure 7.1. Le Glenium 7102 et Adva 405 demandent un peu plus de dosage en SP que le Plastol 5000 et le Viscocrete 2100. Cela peut être attribué à leur bonne rétention d'affaissement dans le temps, qui a pour effet d'augmenter la demande de SP initiale, puisque leur efficacité est plus décalée dans le temps. Comme observé précédemment, la CVK 1 demande plus de SP que la CVK 4.

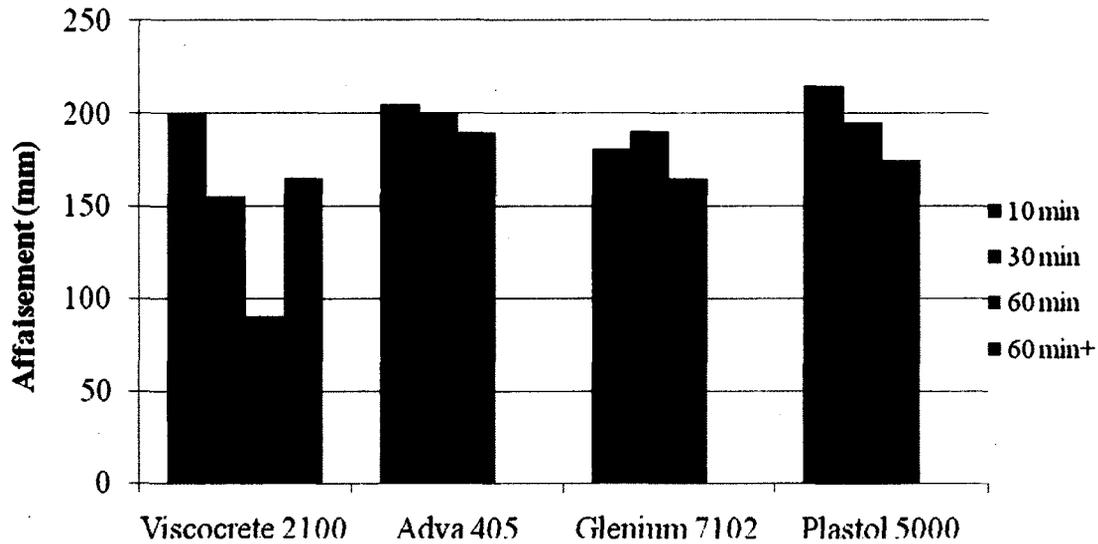


**Figure 7.1 : Demande en SP des mélanges de la phase II**

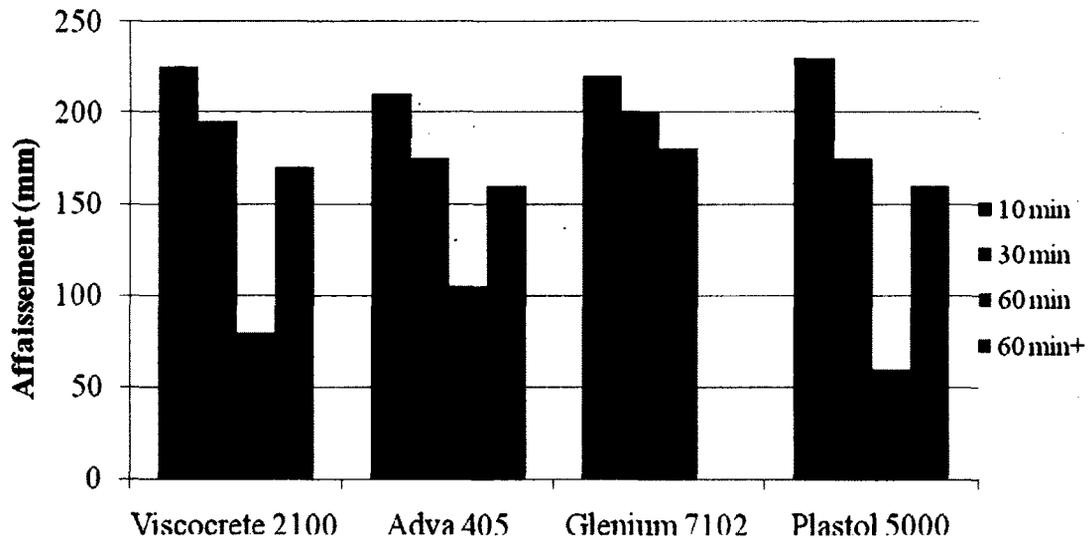
L'évolution des affaissements dans le temps est illustrée aux Figure 7.2, Figure 7.3 et Figure 7.4 pour les témoins et les mélanges avec la CVK 1 et 4 respectivement.

Pour les témoins, la rétention de l'affaissement est plutôt bonne avec tous les SP à l'exception du Viscocrete 2100. C'est en effet seulement avec ce dernier qu'il a été nécessaire d'ajouter du SP à 60 minutes.

Avec la CVK 1, connue pour ses pertes d'affaissements notables dans le temps, seulement le Glenium 7102 offre une bonne rétention, suivi de l'Adva 405. Pour le Plastol 5000 et Viscocrete 2100, les pertes d'affaissement sont les pires. Ces résultats sont en accord avec ce que l'on pouvait s'attendre étant donné que les deux premiers SP devaient offrir une bonne rétention.

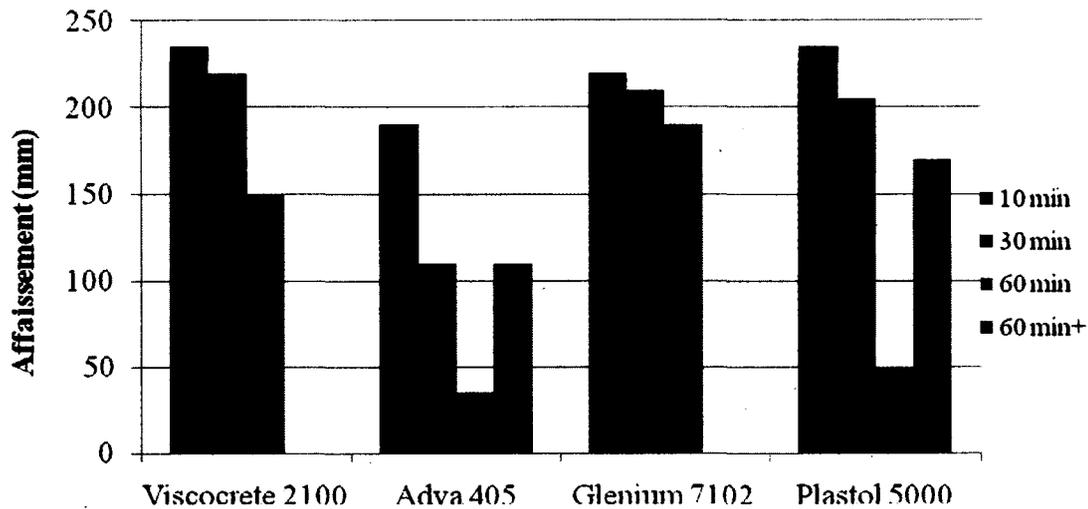


**Figure 7.2 : Évolution de l'affaissement des témoins**



**Figure 7.3 : Évolution de l'affaissement du mélange avec 20% CVK 1**

Dans le cas des mélanges avec la CVK 4, le Glenium 7102 est aussi celui obtenant les meilleurs résultats. Cependant, Adva 405 ne semble pas aussi bien performer, tandis que le Viscocrete performe bien. Il faut cependant prendre en compte l'affaissement initial du mélange avec Viscocrete qui est assez haut, comparativement à celui avec Adva 405, qui est assez bas. Le Plastol 5000 ne montre pas non plus une bonne rétention avec cette cendre, tout comme avec la CVK 1.



**Figure 7.4 : Évolution de l'affaissement du mélange avec 20% CVK 4**

En somme, le Glenium 7102 semble bien performer avec le témoin ainsi que les deux CVK.

## 7.2 Résistances à la compression

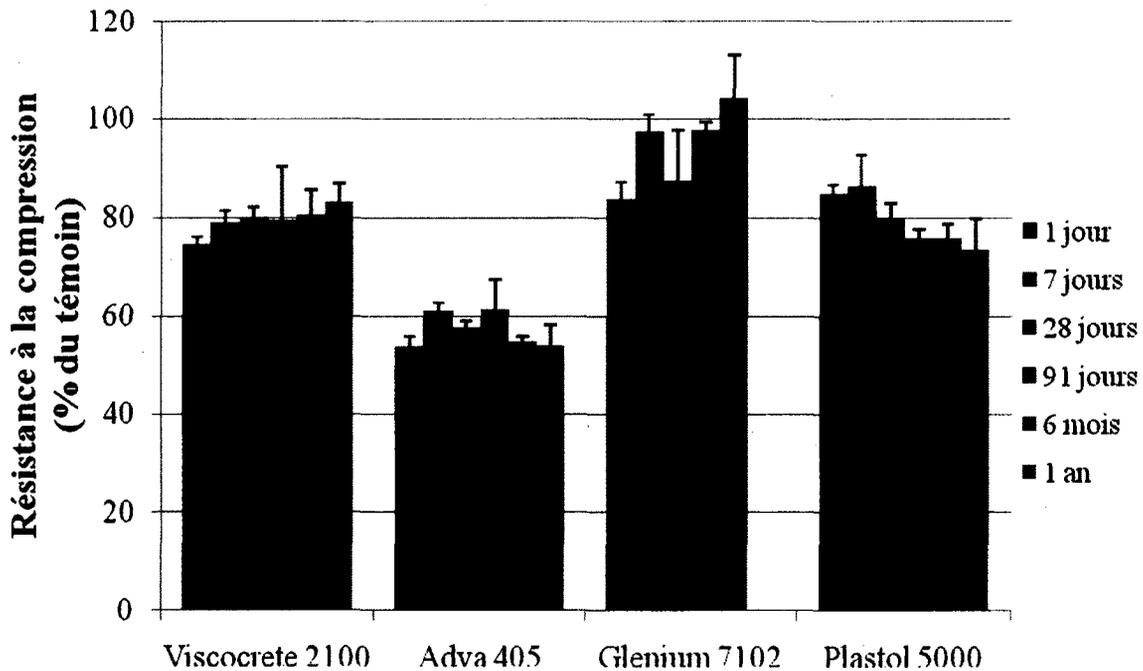
Les résistances à la compression sont données au Tableau 7.3. Celles obtenues avec la CVK 1 sont illustrées à la Figure 7.5 et celles avec la CVK 4 à la Figure 7.6. Une barre d'erreur correspondant à plus ou moins une fois l'écart type relatif des 3 échantillons testés a été incluse pour chacune des résistances.

Avec la CVK 1, les meilleures résistances sont obtenues avec Glenium 7102. Les résultats de Viscocrete 2100 et Plastol 5000 sont similaires, mais inférieurs à Glenium 7102. Les plus bas résultats sont obtenus avec Adva 405. Il est à noter qu'un léger gonflement ainsi que quelques microfissures sont présents lors du démoulage, soit environ 24 heures après le contact eau/liant, sur les échantillons confectionnés avec Viscocrete 2100 et Adva 405. Des photos ont été prises lors du démoulage pour les mélanges effectués avec le Viscocrete 2100 et sont présentées à la Figure 7.7 et à la Figure 7.8. Les microfissures avec Adva 405 ont la même apparence que celles observées avec Viscocrete 2100.

**Tableau 7.3 : Résistances à la compression des mélanges de la phase II**

SP	Mélanges	Résistances à la compression, MPa (% du témoin)					
		1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	6 mois	1 an*
Plastol 5000	Témoin	31,6	46,7	57,6	67,5	70,6	74,0
	20% CVK 1	26,8 (85)	40,3 (86)	46,2 (80)	51,3 (76)	53,6 (76)	54,3 (73)
	20% CVK 4	12,9 (41)	17,8 (38)	23,1 (40)	25,7 (38)	26,9 (38)	-
Viscocrete 2100	Témoin	31,2	45,4	54,2	59,5	63,8	63,9
	20% CVK 1	23,3 (75)	35,9 (79)	43,4 (80)	47,4 (80)	51,4 (81)	53,2 (83)
	20% CVK 4	9,8 (31)	16,0 (35)	17,5 (32)	20,9 (35)	21,8 (34)	22,9 (36)
Adva 405	Témoin	30,4	44,1	53,6	55,1	64,7	69,0
	20% CVK 1	16,3 (54)	27,0 (61)	30,9 (58)	33,8 (61)	35,5 (55)	37,2 (54)
	20% CVK 4	11,4 (38)	17,9 (41)	20,3 (38)	23,3 (42)	23,4 (36)	28,2 (41)
Glenium 7102	Témoin	29,4	45,6	58,5	66,8	63,7	-
	20% CVK 1	24,6 (84)	44,4 (97)	51,1 (87)	65,3 (98)	66,4 (104)	-
	20% CVK 4	9,6 (33)	18,3 (40)	20,6 (35)	24,2 (36)	24,7 (39)	-

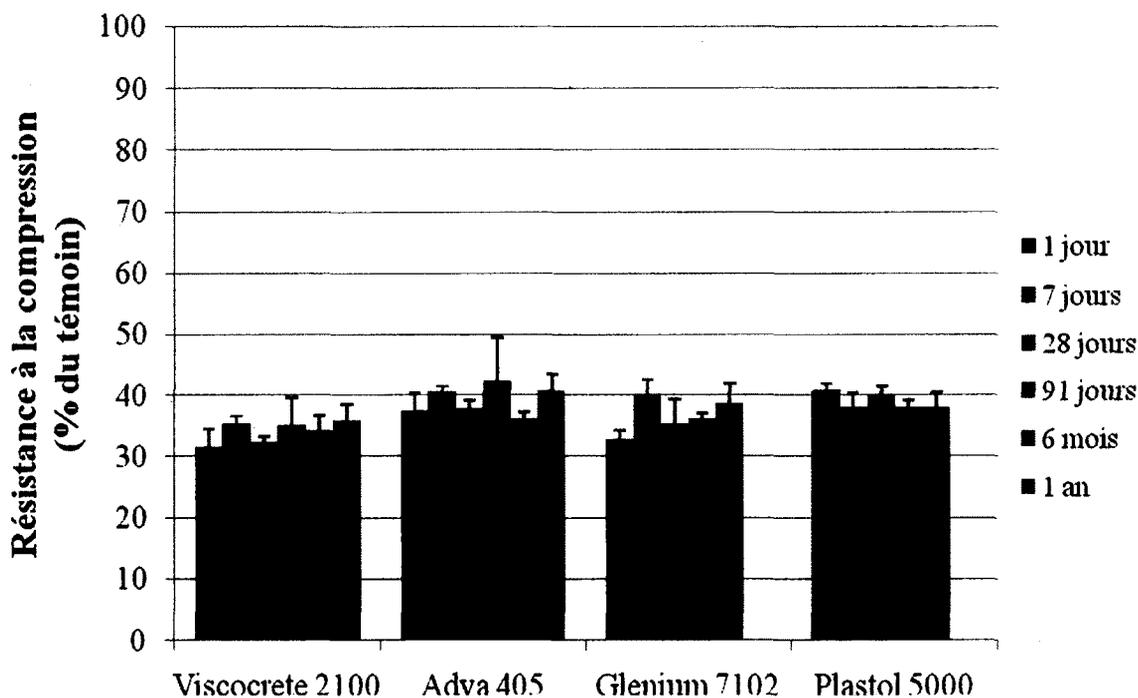
\*Certains résultats ne sont pas encore disponibles



**Figure 7.5 : Résistances à la compression avec la CVK 1**

Avec la CVK 4, tous les SP semblent équivalents, mais tous les résultats sont bas. Cependant, alors que la CVK 4 ne montrait qu'un peu de gonflement et quelques microfissures avec le Plastol 5000, elle en montre davantage avec le Viscocrete 2100 et Adva 405. Des photos ont été prises lors du démoulage pour les mélanges effectués avec le Viscocrete 2100 et sont

présentées à la Figure 7.9 et à la Figure 7.10. Les gonflements et microfissures avec Adva 405 ont la même apparence que celles observées avec Viscocrete 2100.

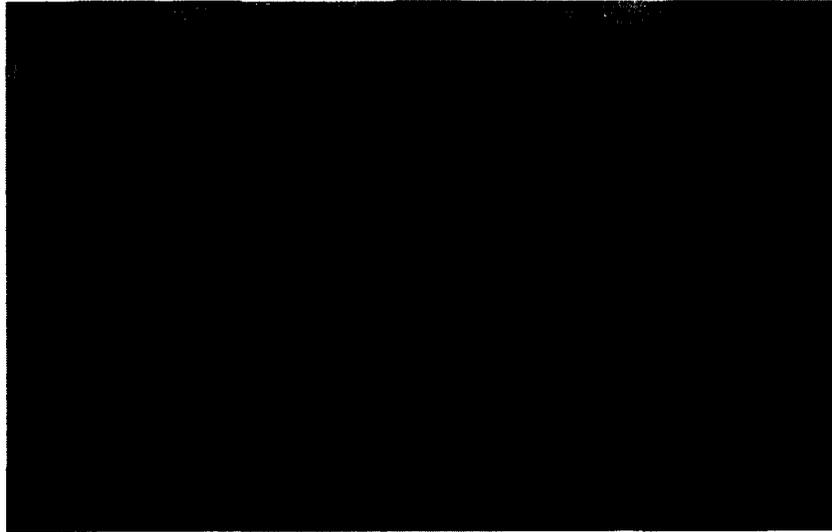


**Figure 7.6 : Résistances à la compression avec la CVK 4**

Ces comportements avec le Viscocrete 2100 et Adva 405 peuvent laisser croire à une possible incompatibilité. Il est à noter que les microfissures semblent être présentes plus particulièrement sur la moitié supérieure des échantillons.



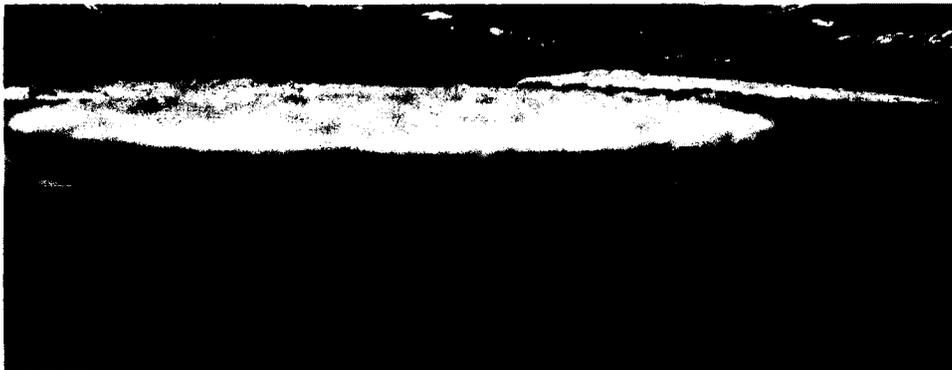
**Figure 7.7 : Microfissures apparentes (Mélange avec 20% CVK 1 et Viscocrete 2100, E/L=0,4)**



**Figure 7.8 : Microfissures apparentes plus en détail (Mélange avec 20% CVK 1 et Viscocrete 2100, E/L=0,4)**



**Figure 7.9 : Gonflement apparent (Mélange avec 20% CVK 4 et Viscocrete 2100, E/L=0,4)**



**Figure 7.10 : Gonflement apparent plus en détail (Mélange avec 20% CVK 4 et Viscocrete 2100, E/L=0,4)**

Ces gonflements et microfissures seraient probablement la cause des basses résistances obtenues, surtout avec la CVK 1 et Adva 405, mais il reste à comprendre pourquoi de tels gonflements et microfissures apparaissent.

À la phase I-C, il a été mentionné que la CVK 3 était celle montrant le plus de gonflement, suivi par la CVK 2 et la CVK 4. Étrangement, les cendres qui ont une grande teneur en CaO libre sont celles qui ne montrent aucun signe de gonflement. Même qu'à l'exception de la CVK 6, les CVK ayant la plus petite teneur en CaO libre sont celles ayant le plus de gonflement. En effet, ce comportement peut paraître étrange puisqu'une forte teneur en CaO peut laisser croire à une plus grande formation de Portlandite, qui est plus volumineuse [O'Farrell *et al.*, 2002]. Dans le cas présent, c'est l'inverse qui se produit. Donc, soit le CaO libre se transforme en Portlandite avant la prise, évitant ainsi la fissuration due au gonflement, soit le CaO libre se transforme en un autre produit d'hydratation. Cependant, les deux CVK montrant le plus de gonflement sont aussi celles ayant le plus de particules supérieures à 45 µm. Ces plus grosses particules s'hydratent probablement moins rapidement. Dans le cas où le CaO libre se retrouve à l'intérieur de particules plus grossières, il est possible qu'il ne puisse pas former de la chaux hydratée avant la prise, ce qui entraîne des gonflements. Il est donc possible que ce soit un simple hasard que les CVK ayant un fort pourcentage de particules grossières aient une petite quantité de CaO libre.

Bien qu'elle ait une grande proportion de particules supérieures à 45 µm, la CVK 6 ne montre aucun gonflement.

### **7.3 Conclusions**

Le SP Glenium 7102 montre un meilleur comportement au niveau de la rétention de l'affaissement dans le temps avec tous les mélanges. De plus, il montre des résistances à la compression un peu supérieures à celles développées avec le Plastol 5000 pour les mélanges avec la CVK 1.

Quelques problèmes de compatibilité semblent survenir avec les SP Viscocrete 2100 et Adva 405. Des gonflements et microfissures sont apparents sur les échantillons des mélanges avec

CVK, plus particulièrement avec la CVK 4, qui montrait déjà des signes de microfissures légères avec Plastol 5000.

## CHAPITRE 8

### RÉSULTATS DE LA PHASE III :

#### Mélanges ternaires

Comme il est possible de le constater, les différentes CVK reçues démontrent des performances très différentes les unes des autres. Afin de tenter de rendre les mélanges contenant les CVK plus robustes, il a été convenu de poursuivre la recherche sous une approche de mélange ternaire.

Le rapport E/L a été gardé constant à 0,4 et le Plastol 5000 a été utilisé comme SP. Deux séries de mélanges ont été faites, l'une avec la CVK 1, l'autre avec la CVK 4. Dans chacune des séries, un témoin contenant 100 % de ciment a été fait ainsi que deux mélanges binaires contenant chacun 20 % de remplacement du ciment par une CVK et une CVF. Un des mélanges ternaires contenait une combinaison de 10 % CVK et 10 % CVF dans le but de connaître l'effet couplé des CVK avec une CVF. Par la suite, les mélanges ternaires contenaient 20 % de CVK avec 5 % de fumée de silice (FS), 8 % de métakaolin (MK) ou 25 % de laitier (L) en remplacement du ciment. Un mélange contenant 20 % de CVF a aussi été fait avec 5 % de FS. Les mélanges effectués sont présentés au Tableau 8.1.

**Tableau 8.1 : Composition des mélanges de la phase III**

<b>CVK</b>	<b>Mélanges</b>	<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CVK (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CVF (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>FS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MK (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>L (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Sable (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Granulat 20mm (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>SP (%)*</b>
<b>CVK 1</b>	Témoin	400	-	-	-	-	-	802	1070	0,189
	20% CVK	320	80	-	-	-	-	788	1070	0,454
	20% CVF	320	-	80	-	-	-	794	1070	0,177
	10% CVK+10% CVF	320	40	40	-	-	-	791	1070	0,309
	20% CVK+5% FS	300	80	-	20	-	-	782	1070	0,546
	20% CVF+5% FS	300	-	80	20	-	-	775	1070	0,187
	20% CVK+8% MK	288	80	-	-	32	-	781	1070	0,446
	20% CVK+25% L	220	80	-	-	-	100	782	1070	0,438
<b>CVK 4</b>	Témoin	400	-	-	-	-	-	802	1070	0,189
	20% CVK	320	80	-	-	-	-	792	1070	0,341
	20% CVF	320	-	80	-	-	-	794	1070	0,177
	10% CVK+10% CVF	320	40	40	-	-	-	793	1070	0,224
	20% CVK+5% FS	300	80	-	20	-	-	783	1070	0,389
	20% CVF+5% FS	300	-	80	20	-	-	775	1070	0,187
	20% CVK+8% MK	288	80	-	-	32	-	782	1070	0,345
	20% CVK+25% L	220	80	-	-	-	100	783	1070	0,295

Note : Les formulations corrigées en fonction des masses volumiques réelles sont présentées à l'Annexe A

\*Les quantités de SP totales sont données en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse du liant

## 8.1 Série avec la CVK 1

Les données à l'état frais sont données au Tableau 8.2. Les valeurs d'affaissement visées étaient de 210 mm à 10 minutes et 150 mm à 60 minutes. Lorsque nécessaire, certains mélanges se voyaient ajouter du SP afin d'ajuster leur affaissement à 60 minutes.

**Tableau 8.2 : Données à l'état frais des mélanges de la phase III-CVK 1**

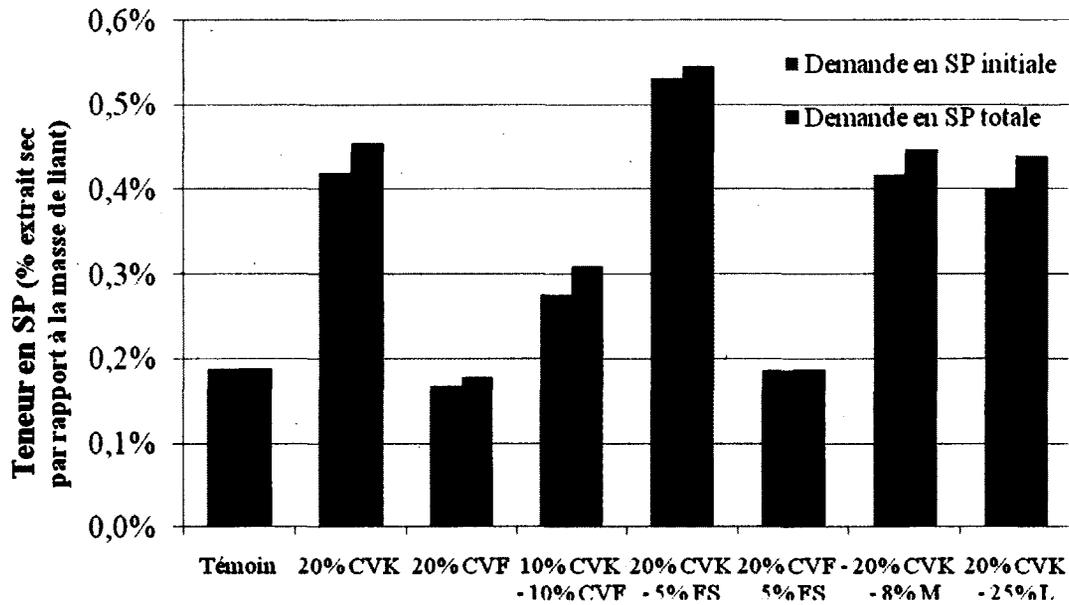
Mélanges	Affaissement (mm)				Air (%)		M. Vol. (kg/m <sup>3</sup> )		Température (C°)	
	Temps (min)									
	10	30	60	60+*	10	60	10	60	10	60
Témoin	210	200	150	-	1,4	-	2475	-	20,0	-
20% CVK	205	125	50	130	1,4	-	2460	-	23,0	23,0
20% CVF	200	150	90	150	1,7	-	2427	-	21,5	-
10% CVK+10% CVF	195	100	55	155	1,4	1,4	2455	2465	21,5	21,5
20% CVK+5% FS	230	200	95	150	-	1,5	-	2468	20,5	21,0
20% CVF+5% FS	200	170	140	-	1,9	1,9	2417	2430	20,0	20,0
20% CVK+8%MK	240	145	40	160	1,8	-	2443	-	20,5	-
20% CVK+25%L	230	185	75	195	1,7	-	2420	-	21,0	-

\*Valeurs obtenues après ajout de SP à 60 minutes

### 8.1.1 Propriétés à l'état frais

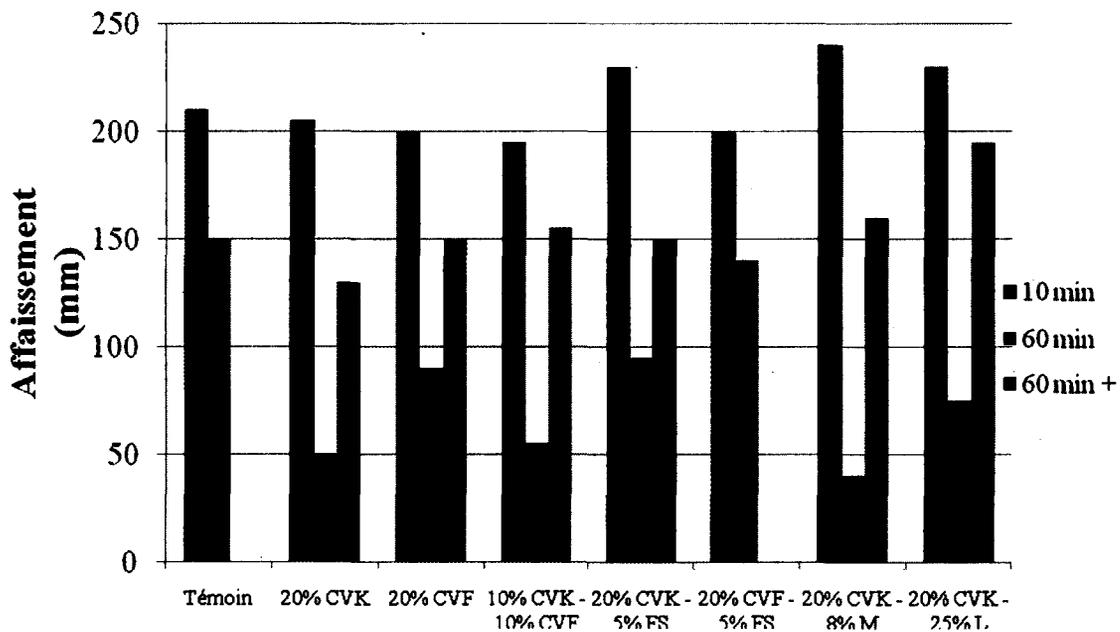
Les demandes en SP de tous les mélanges de la phase III sont illustrées à la Figure 8.1. La bande initiale illustre la demande en SP à 10 minutes tandis que la bande totale illustre la demande en SP totale après ajout de SP à 60 minutes lorsque requis. L'évolution de l'affaissement dans le temps est illustrée à la Figure 8.2.

Tout comme observé dans les phases précédentes, la CVK a une forte demande en SP (0,454%), contrairement à la CVF (0,177%). Le couplage ternaire de 10 % de chacune d'entre elles donne une demande en SP environ égale à la moyenne de chacun des mélanges binaires (0,309%). L'utilisation de la fumée de silice avec 20 % de CVK ou de CVF augmente la quantité de superplastifiant par rapport au mélange binaire, ce qui semble normal. Cet effet est plus important avec la CVK. Il n'y a pas de différence notable lors de l'utilisation de MK ou de laitier.



**Figure 8.1 : Demande en SP des mélanges de la phase III-CVK 1**

Il n'y a pas de surprise dans l'évolution de l'affaissement dans le temps. Lorsque la CVK est utilisée, il y a une grande perte d'affaissement, le mélange avec du métakaolin étant le pire.



**Figure 8.2 : Évolution de l'affaissement dans le temps des mélanges de la phase III-CVK 1**

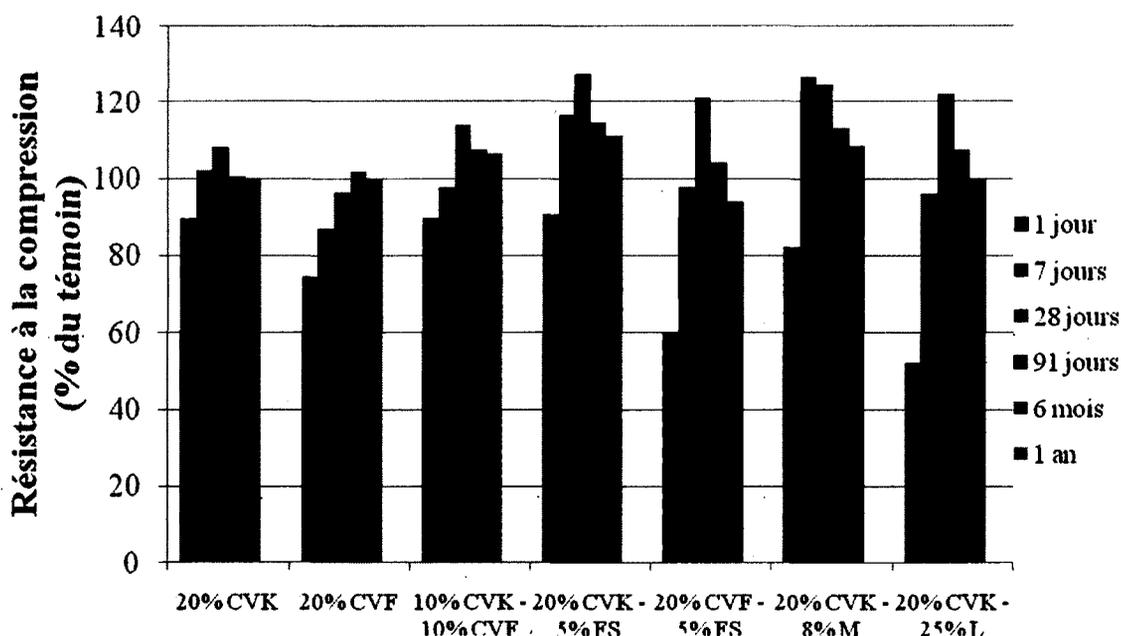
## 8.1.2 Résistances à la compression

Les résultats des résistances à la compression sont donnés au Tableau 8.3 et illustrés à la Figure 8.3.

**Tableau 8.3 : Résistances à la compression des mélanges de la phase III-CVK 1**

Mélanges	Résistances à la compression, MPa (% du témoin)					
	1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	6 mois	1 an*
Témoin	31,7	48,7	55,2	68,1	74,2	-
20% CVK	28,4 (90)	49,8 (102)	59,7 (108)	68,3 (100)	73,9 (100)	-
20% CVF	23,6 (74)	42,3 (87)	53,2 (96)	69,3 (102)	74,0 (100)	-
10% CVK+10% CVF	28,4 (90)	47,6 (98)	62,9 (114)	73,3 (108)	78,9 (106)	-
20% CVK+5% FS	28,7 (91)	56,7 (116)	70,4 (128)	78,1 (115)	82,5 (111)	-
20% CVF+5% FS	19,0 (60)	47,9 (98)	66,7 (121)	70,9 (104)	69,8 (94)	-
20% CVK+8%MK	26,1 (82)	61,7 (127)	68,9 (125)	77,2 (113)	80,5 (108)	-
20% CVK+25%L	16,6 (52)	46,7 (96)	67,4 (122)	73,2 (107)	73,9 (100)	-

\*Certains résultats ne sont pas encore disponibles



**Figure 8.3 : Résistances à la compression de la phase III-Avril 08**

En prenant les résultats du béton avec 20% de CVK et les résultats du béton avec 20% de CVF, il est possible de constater que celui avec 10% de CVK et 10% CVF se situe un peu plus haut que la moyenne des deux. Mais les résultats des trois mélanges sont tout de même près les uns les autres. L'ajout de FS apporte un gain de résistance autant à la CVK qu'au CVF,

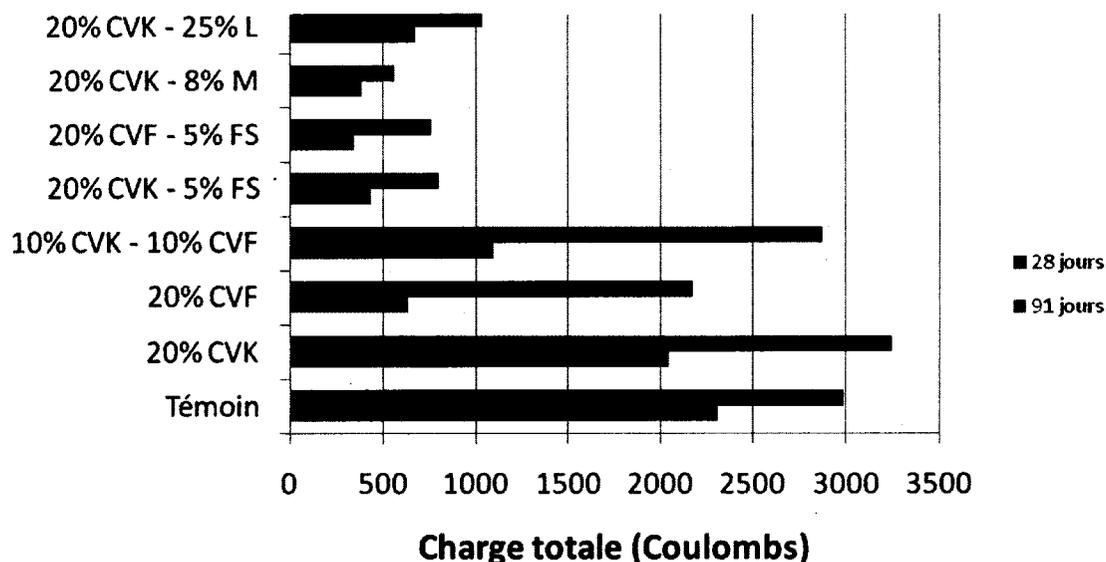
mais étonnamment, pas pour les résistances à 1 jour. La même chose se produit avec le MK et le laitier. Dans le cas du laitier, comme son hydratation est lente, il est logique de s'attendre à ce genre de comportement, mais pas dans le cas du MK et de la FS.

### 8.1.3 Perméabilités aux ions chlore

Les résultats des perméabilités aux ions chlore sont donnés au Tableau 8.4 et illustrés à la Figure 8.4.

**Tableau 8.4 : Perméabilités aux ions chlore des mélanges de la phase III-CVK 1**

Mélanges	Charge totale (Coulombs)	
	28 jours	91 jours
Témoin	2987	2310
20% CVK	3245	2045
20% CVF	2173	635
10% CVK+10% CVF	2867	1096
20% CVK+5% FS	798	434
20% CVF+5% FS	756	344
20% CVK+8%MK	560	384
20% CVK+25%L	1036	677



**Figure 8.4 : Perméabilités aux ions chlore de la phase III-CVK 1**

La perméabilité du mélange de 10% de CVK et 10% CVF se situe environ à la moyenne des deux mélanges binaires. À 28 jours il est plus haut que la moyenne tandis qu'à 91 jours, il est

plus bas que la moyenne. L'ajout de FS fait baisser la perméabilité de façon importante, autant à 28 qu'à 91 jours. L'effet est plus important sur la CVK que la CVF, cette dernière ayant déjà une faible perméabilité. La même chose se produit avec le MK et le laitier.

## 8.2 Série avec la CVK 4

Les données à l'état frais sont présentées au Tableau 8.5. Les valeurs d'affaissement visées étaient de 210 mm à 10 minutes et 150 mm à 60 minutes. Lorsque nécessaire, certains mélanges se voyaient ajouter du SP afin d'ajuster leur affaissement à 60 minutes.

**Tableau 8.5 : Données à l'état frais des mélanges de la phase III-CVK 4**

Mélanges	Affaissement (mm)				Air (%)		M. Vol. (kg/m <sup>3</sup> )		Température (C°)	
	Temps (min)									
	10	30	60	60+*	10	60	10	60	10	60
Témoin	210	200	150	-	1,4	-	2475	-	20,0	-
20% CVK	235	205	50	170	1,5	-	2472	-	21,0	-
20% CVF	200	150	90	150	1,7	-	2427	-	21,5	-
10% CVK+10% CVF	200	110	55	145	1,6	-	2445	-	21,0	-
20% CVK+5% FS	215	130	60	170	1,7	-	2437	-	21,0	-
20% CVF+5% FS	200	170	140	-	1,9	1,9	2417	2430	20,0	20,0
20% CVK+8%MK	200	55	0	165	1,3	-	2459	-	21,7	-
20% CVK+25%L	225	190	60	160	1,5	-	2444	-	21,0	-

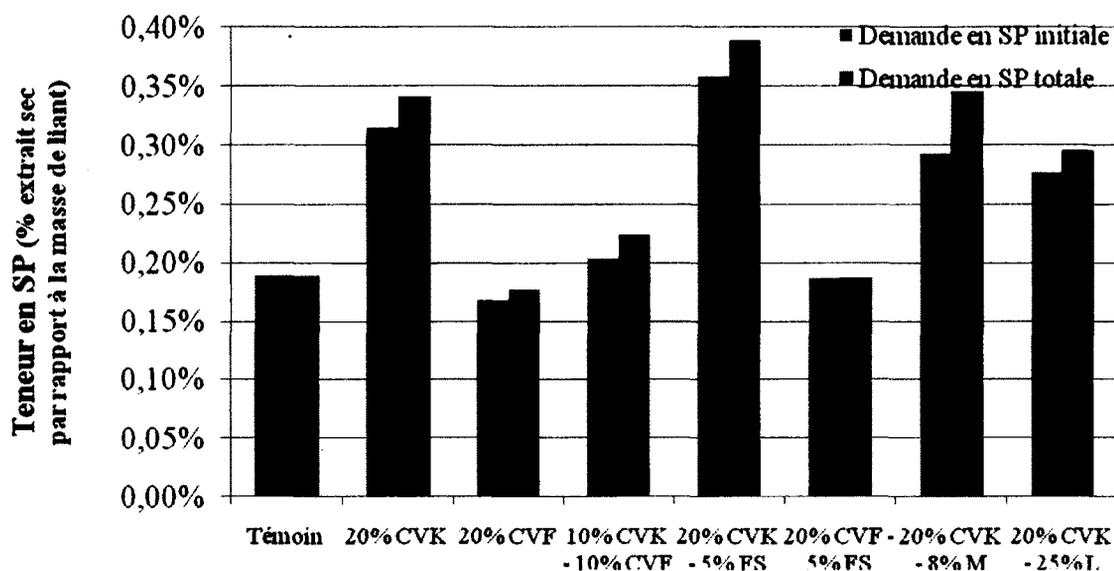
\*Valeurs obtenues après ajout de SP à 60 minutes

### 8.2.1 Propriétés à l'état frais

Les demandes en SP de tous les mélanges de la phase III sont illustrées à la Figure 8.5. La bande initiale illustre la demande en SP à 10 minutes tandis que la bande totale illustre la demande en SP totale après ajout de SP à 60 minutes lorsque requis. L'évolution de l'affaissement dans le temps est illustrée à la Figure 8.6.

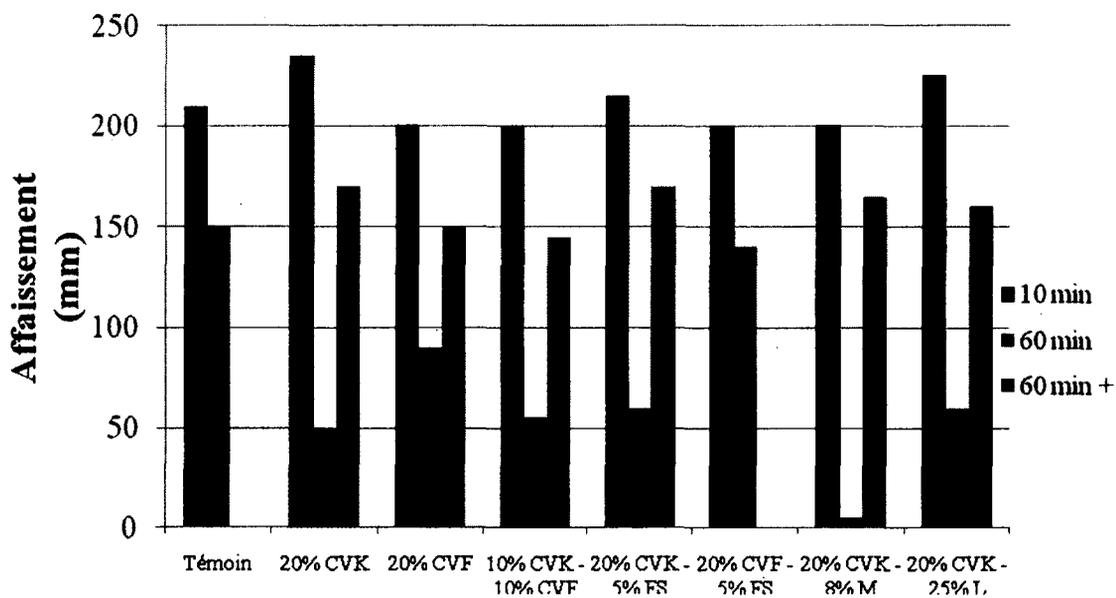
Tout comme observé dans les phases précédentes, la CVK a une demande en SP élevée (0,341%), contrairement à la CVF (0,177%). Le couplage ternaire de 10 % de chacune d'entre elles donne une demande en SP un peu plus faible que la moyenne de chacun des mélanges binaires (0,224%). L'utilisation de la fumée de silice avec 20 % de CVK ou de CVF augmente un peu la quantité de superplastifiant par rapport au mélange binaire. Cet effet est plus

important avec la CVK. Encore une fois, il n'y a pas de différence notable lors de l'utilisation de MK ou de laitier.



**Figure 8.5 : Demande en SP des mélanges de la phase III-CVK 4**

Comme observé avec la CVK 1, lorsque la CVK 4 est utilisée, il y a une grande perte d'affaissement. Ici aussi, le mélange avec du métakaolin est celui ayant la plus grande perte d'affaissement dans le temps.



**Figure 8.6 : Évolution de l'affaissement dans le temps des mélanges de la phase III-CVK 4**

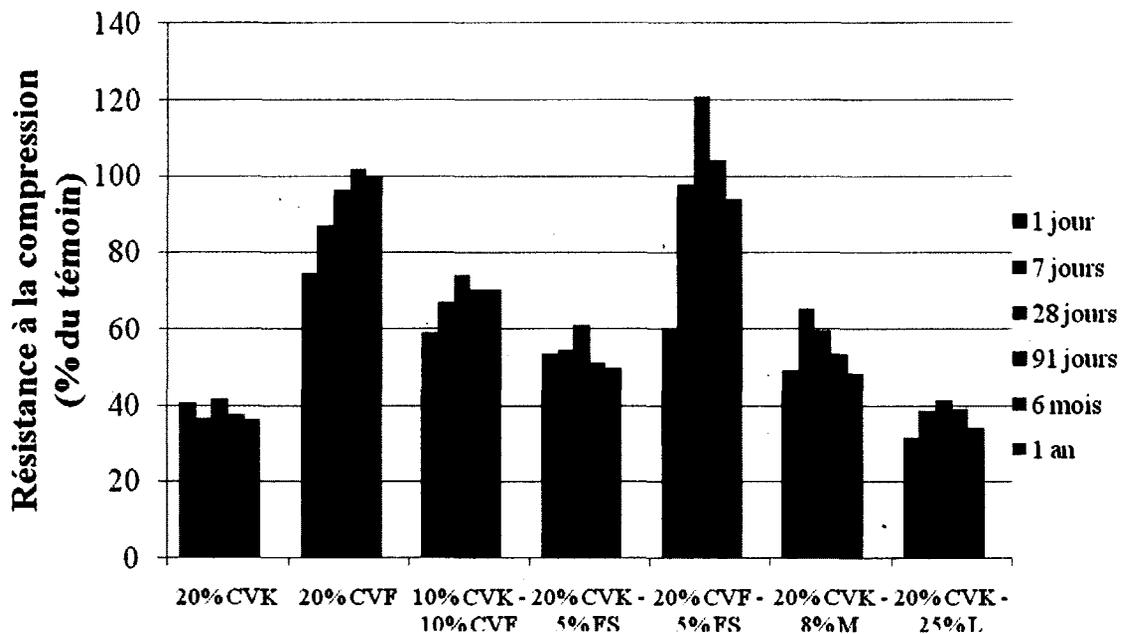
## 8.2.2 Résistances à la compression

Les résultats sont donnés au Tableau 8.6 et sont illustrés à la Figure 8.7.

**Tableau 8.6 : Résistances à la compression des mélanges de la phase III-CVK 4**

Mélanges	Résistances à la compression, MPa (% du témoin)					
	1 jour	7 jours	28 jours	91 jours	6 mois	1 an*
Témoin	31,7	48,7	55,2	68,1	74,2	-
20% CVK	12,9 (41)	17,8 (37)	23,1 (42)	25,7 (38)	26,9 (36)	-
20% CVF	23,6 (74)	42,3 (87)	52,8 (96)	69,5 (102)	74,0 (100)	-
10% CVK+10% CVF	18,7 (59)	32,6 (67)	40,9 (74)	48,0 (71)	52,3 (70)	-
20% CVK+5% FS	17,0 (54)	26,5 (54)	33,6 (61)	34,9 (51)	37,0 (50)	-
20% CVF+5% FS	19,0 (60)	47,9 (98)	66,7 (121)	70,9 (104)	69,8 (94)	-
20% CVK+8%MK	15,6 (49)	31,8 (65)	32,9 (60)	36,5 (54)	36,0 (49)	-
20% CVK+25%L	10,0 (32)	18,9 (39)	22,8 (41)	26,5 (39)	25,4 (34)	-

\*Certains résultats ne sont pas encore disponibles



**Figure 8.7 : Résistances à la compression de la phase III-CVK 4**

Il est possible de voir que la combinaison 10% de CVK avec 10% CVF se retrouve presque exactement entre les résultats du béton avec 20% de CVK et les résultats du béton avec 20% de CVF. Cette tendance s'observe mieux avec la CVK 4 qu'avec la CVK 1, étant donné que l'écart entre la CVK et la CVF est plus grand.

L'ajout de FS apporte un gain de résistance autant à la CVK qu'au CVF. Encore ici, l'ajout de FS, de MK et de laitier ne semble pas faire augmenter les résistances à 1 jour, contrairement à

ce dont l'on pourrait s'attendre. Seule exception faite du mélange de CVK avec FS, où il n'y a pas de différence notable entre les résistances des différents âges.

Tout comme la combinaison ternaire avec FS, le MK apporte un gain de résistance, mais pas autant que la combinaison 10%CVK-10%CVF, contrairement aux résultats avec la CVK 1. La combinaison avec 25% de laitier est plutôt faible. En effet, lors du démoulage, le béton était tellement faible que certains échantillons ont fissuré et même cassé à cause des contraintes exercées sur l'éprouvette lors du démoulage.

### 8.2.3 Perméabilités aux ions chlore

Les résultats sont donnés au Tableau 8.7 et sont illustrés à la Figure 8.8.

**Tableau 8.7 : Perméabilités aux ions chlore des mélanges de la phase III-CVK 4**

Mélanges	Charge totale (Coulombs)	
	28 jours	91 jours
Témoin	2987	2310
20% CVK	4934	3390
20% CVF	2173	635
10% CVK+10% CVF	2056	1355
20% CVK+5% FS	1665	909
20% CVF+5% FS	756	344
20% CVK+8%MK	883	591
20% CVK+25%L	2041	1253

À 91 jours, la perméabilité du mélange de 10% de CVK et 10% CVF se situe plus bas que la moyenne des deux mélanges binaires, tout comme avec la CVK 1. La valeur à 28 jours semble cependant étonnamment basse. L'ajout de FS fait baisser la perméabilité de façon importante, autant à 28 qu'à 91 jours. L'effet est plus important sur la CVK que la CVF. La même chose se produit avec le MK et le laitier, même si ce dernier a obtenu de faibles résistances.

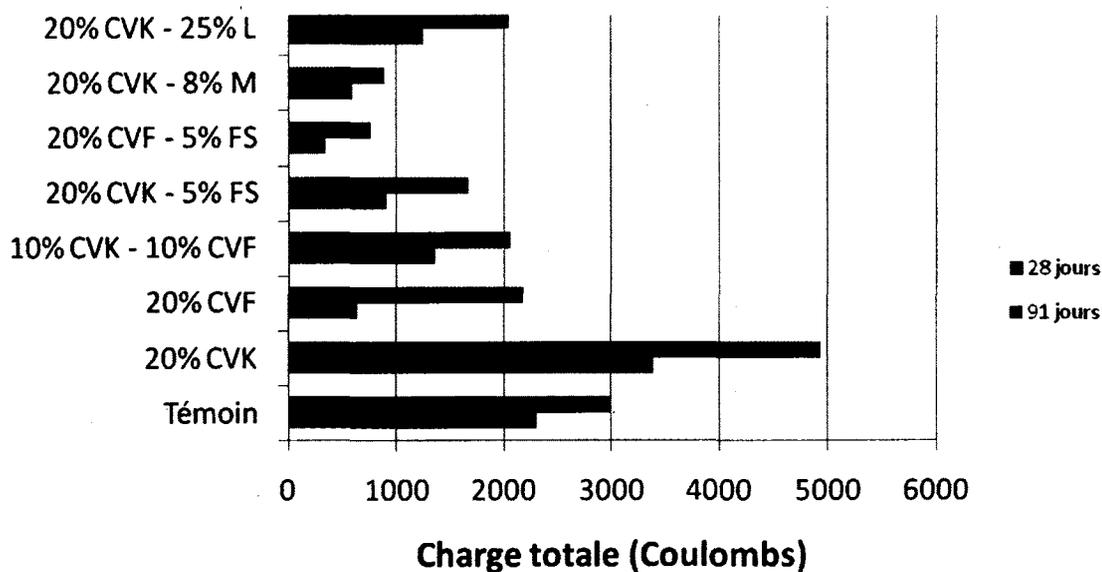
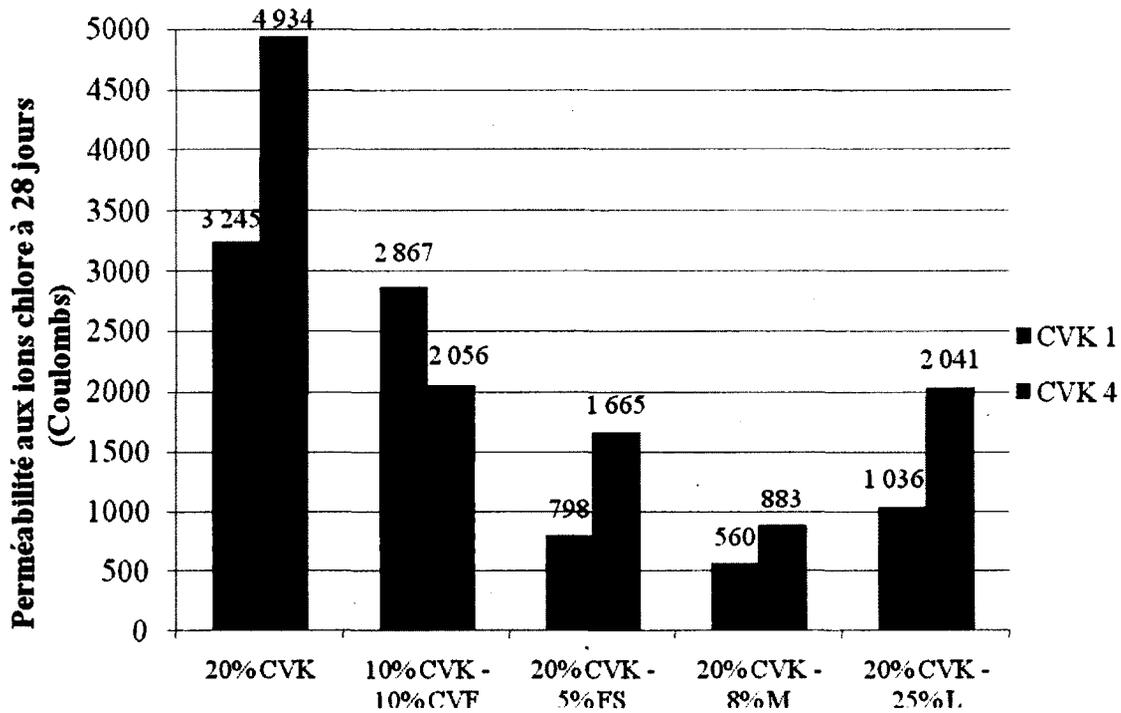


Figure 8.8 : Perméabilités aux ions chlore de la phase III-CVK 4

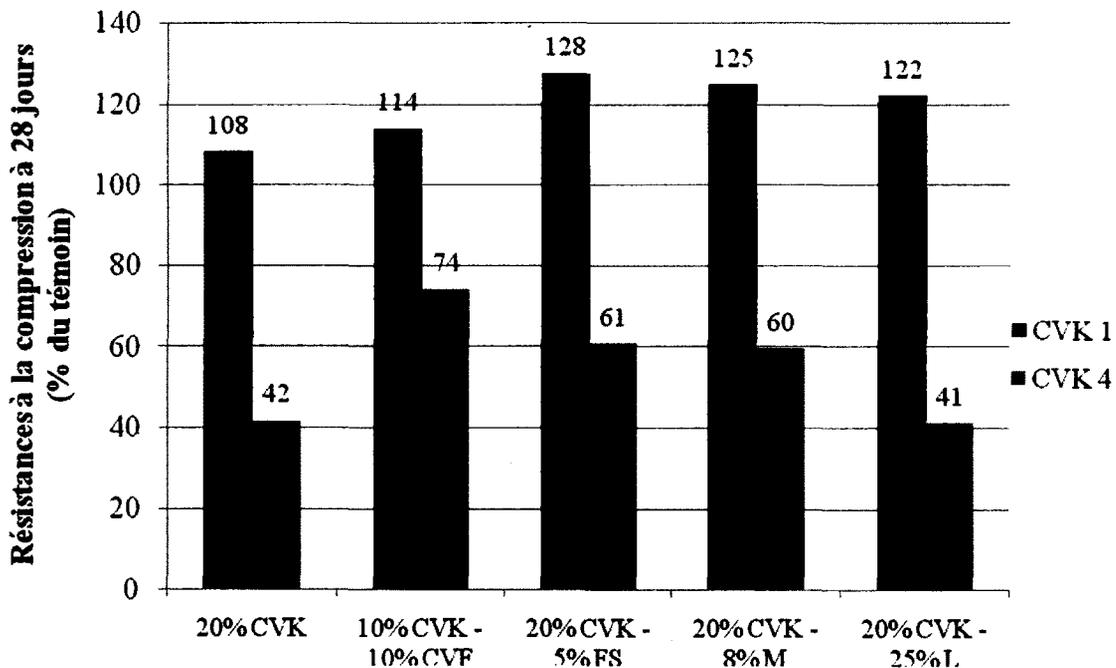
### 8.3 Robustesse

Afin de vérifier si l'écart entre les résultats des deux cendres diminue à l'intérieur de mélanges ternaires, quelques propriétés ont été choisies. La Figure 8.9 illustre la perméabilité aux ions chlore à 28 jours selon les mélanges avec les deux cendres. L'écart entre les deux mélanges binaires semble visuellement plus grand que les écarts entre les mélanges ternaires. Cependant, en les présentant sous forme de pourcentage, l'écart entre les mélanges binaires est de 34 % tandis que les écarts entre les mélanges ternaires sont respectivement de -28 %, 52 %, 37 % et 49 %.



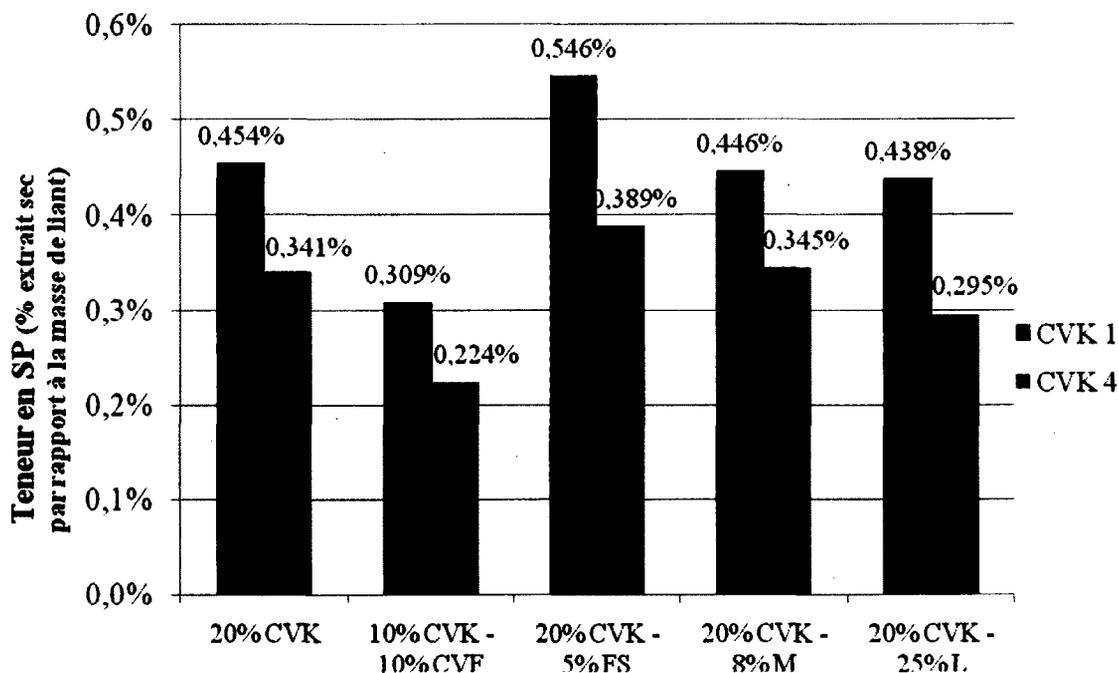
**Figure 8.9 : Perméabilité aux ions chlore à 28 jours selon les mélanges**

La Figure 8.10 illustre la résistance à la compression à 28 jours selon les mélanges avec les deux cendres. L'écart entre les mélanges binaires est de 61 % tandis que les écarts entre les mélanges ternaires sont respectivement de 35 %, 52 %, 52 % et 66 %.



**Figure 8.10 : Résistance à la compression à 28 jours selon les mélanges**

La Figure 8.11 illustre la demande en SP des mélanges avec les deux cendres. L'écart entre les mélanges binaires est de 25 % tandis que les écarts entre les mélanges ternaires sont respectivement de 28 %, 29 %, 23 % et 33 %.



**Figure 8.11 : Demande en SP selon les mélanges**

Cet exercice a aussi été fait avec les résistances à la compression à 1 jour et 6 mois ainsi qu'avec la perméabilité aux ions chlore à 91 jours. Tous les résultats sont présentés au Tableau 8.8.

**Tableau 8.8 : Pourcentage d'écart entre les performances des deux CVK**

	ions Cl 28 j	ions Cl 91 j	f <sub>c</sub> 1j	f <sub>c</sub> 28j	f <sub>c</sub> 6 mois	Demande SP	Somme des écarts (%)
<b>20% CVK</b>	34	40	54	61	62	25	276
<b>10%/10%</b>	-28	19	34	35	-4	28	112*
<b>5% FS</b>	52	52	41	52	35	29	261
<b>8% MK</b>	37	35	40	52	30	23	217
<b>25% L</b>	49	46	38	66	47	33	279

\*L'écart négatif pour la perméabilité des ions Cl à 28 jours n'a pas été pris en compte

Dans plusieurs cas, la combinaison ternaire diminue l'écart entre la performance des deux cendres. Pour la demande en SP, toutes les performances sont semblables, ce qui indique que la combinaison ternaire n'est pas nécessairement plus robuste que le binaire. Pour les

propriétés à l'état durci, la combinaison la plus efficace est celle composée de 10 % CVK et 10 % CVF. Cette combinaison est toujours plus robuste que le binaire. D'une façon moins évidente, la combinaison avec le MK est aussi plus robuste dans presque tous les cas, suivi de la combinaison avec FS, qui est un peu plus robuste pour les résistances à la compression. Finalement, la combinaison avec laitier a environ la même robustesse que les mélanges binaires. De façon générale, les mélanges ternaires sont plus robustes au niveau des résistances à la compression, ce qui n'est pas autant le cas avec les perméabilités aux ions chlore.

## 8.4 Conclusions

L'utilisation d'une combinaison de 10% de CVK et CVF donne des performances environ égales à la moyenne entre les résultats des deux mélanges binaires contenant 20% de CVK ou de CVF. Il n'y a donc pas apparence d'activation de la CVK par la CVF ou l'inverse. L'utilisation conjointe de fumée de silice, de métakaolin ou de laitier avec la cendre Kruger diminue étonnamment un peu les résistances à jeune âge, mais augmente celles à plus long terme. Elle abaisse cependant les perméabilités de façon importante.

En se basant sur la consommation de superplastifiant très basse de la combinaison 10%CVF/10% CVK, ce mélange est plutôt optimal, étant donné qu'il obtient aussi des résistances presque aussi grandes que les autres mélanges ternaires et obtient une perméabilité assez basse à 91 jours. Avec une cendre à faibles résistances à la compression comme la CVK 4, la combinaison 10% CVF/10% CVK semble d'autant plus optimale. En effet, elle donne les meilleures résistances, les consommations de superplastifiant les plus basses et des perméabilités aux ions chlore qui semblent assez basses.

Dans tous les cas, la combinaison d'une CVK avec une CVF semble optimale. Cette combinaison aide à améliorer la maniabilité du mélange, ce qui est un des points faibles des CVK. Paya *et al.*, (2002) avaient d'ailleurs effectué des essais sur des cendres provenant de l'incinération des boues des eaux usées et montraient l'avantage d'utiliser des CVF pour pallier au manque d'ouvrabilité. De plus, elle abaisse les perméabilités de façon suffisante, même si ce n'est pas autant qu'avec le métakaolin ou la fumée de silice par exemple. De plus, les résistances demeurent très bonnes.

En ce qui a trait à la robustesse des CVK en milieu ternaire, les résultats semblent démontrer une meilleure robustesse en système ternaire, particulièrement pour la combinaison 10% CVF/10 % CVK. Tout semble donc converger vers une combinaison optimale de CVK avec la CVF.



# CHAPITRE 9

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 9.1 Sommaire

La phase I avait pour objectif de connaître et comprendre les CVK afin d'en faire l'optimisation. En somme, la phase I-A met en évidence;

- la consommation plus élevée en SP des mélanges avec la CVK 4;
- ainsi qu'une perte d'affaissement plus rapide.

La phase I-B montre que les mélanges avec cette même CVK obtiennent;

- des résistances à la compression plus faibles, environ 58 % du témoin pour un rapport E/L de 0,4;
- et une perméabilité plus élevée, environ 22 % de plus que le témoin à 91 jours.

Il y a cependant des signes qui montrent une certaine activité à jeune âge plus importante au niveau des résistances à la compression et de la chaleur d'hydratation, tandis qu'il se produit l'inverse avec les perméabilités. Il y aurait aussi une certaine attention à porter à l'entraînement de l'air, qui semble plus difficile à obtenir et à maintenir.

La phase I-C compare entre elles les différentes CVK reçues à des taux de remplacement de 20 % pour des rapports E/L de 0,55 et 0,4. Elle confirme que :

- Toutes les CVK demandent plus de SP qu'un témoin. Cette demande semble être reliée en grande partie au pourcentage de particules inférieures à 3  $\mu\text{m}$ .
- Les CVK 1, 5 et 6 montrent des résistances à la compression entre 80 et 105 % du témoin, tandis que les CVK 2, 3 et 4 obtiennent des résistances plus faibles, entre 30 et 45 % du témoin.

- Les CVK ayant les meilleures résistances sont celles ayant une haute teneur en CaO libre.
- La plus grande activité à jeune âge des CVK observée avec les résistances à la compression lors de la phase I-B est confirmée.
- L'activité à plus long terme des CVK observée avec les perméabilités lors de la phase I-B est aussi confirmée.
- Des temps de prise mesurés sur les mélanges de rapport E/L de 0,4 montrent un léger retard pour toutes les CVK comparativement au témoin.
- Du gonflement et des microfissures sont apparents sur les mélanges contenant les CVK 2, 3 et 4, la CVK 3 étant la pire et la CVK 4 étant la moins pire.

La phase II avait pour but de vérifier la compatibilité avec certains SP de type polycarboxylate. Quatre SP avaient été testés à l'intérieur de mélanges de rapport E/L de 0,4 et à un taux de remplacement de 20 % des CVK 1 et 4. Les conclusions suivantes ont pu être tirées :

- Le Glenium 7102 est le SP ayant le meilleur comportement au niveau de la rétention de l'affaissement dans le temps avec tous les mélanges. Il montre aussi des résistances à la compression équivalentes ou légèrement supérieures à celles développées avec le Plastol 5000 pour les mélanges avec la CVK 1.
- Quelques problèmes de compatibilité semblent survenir avec le Viscocrete 2100 et Adva 405. Les gonflements et microfissures observés lors de la phase I-C semblent accentués par ces deux SP.

La phase III devait dire s'il était possible de diminuer la variabilité entre les CVK en les utilisant à l'intérieur de systèmes ternaires. Les résultats montrent que;

- La combinaison d'une CVK et d'une CVF offre la meilleure robustesse.

## 9.2 Contributions originales

Cette étude aura permis de faire avancer la recherche sur les ACA au Québec. Avec les contraintes écologiques de plus en plus présentes, il faudra trouver des solutions plus avantageuses pour l'environnement. L'utilisation des CVK dans les bétons permettrait non seulement de réduire l'utilisation du ciment, mais éviterait d'enfouir des tonnes de cendres.

Ce projet aura permis de mieux comprendre les différences entre les CVK produites et de se rapprocher d'une utilisation optimale, tant par l'utilisation du meilleur SP que par la meilleure combinaison ternaire. De plus, par rapport aux autres recherches faites dans le domaine, il permet de voir que des conditions de production, plus particulièrement les différentes matières premières brûlées, peuvent avoir un impact majeur sur les performances des cendres produites sur béton. De plus, l'étude avec différents SP montre que certains d'entre eux peuvent avoir des problèmes de compatibilité.

## 9.3 Perspectives de recherche

Cette étude a mis en évidence quelques problèmes de gonflement et de microfissures présentes sur certaines CVK. Cependant, ces gonflements et microfissures n'ont pas été quantifiés. Il est alors difficile de pousser plus loin l'hypothèse d'un lien entre ces phénomènes et le pourcentage de particules supérieur à 45  $\mu\text{m}$ . En utilisant des cordes vibrantes ou en trouvant un moyen de mesurer les microfissures, il serait alors possible d'établir une relation. S'il s'avérait que c'était lié, il n'y aurait probablement qu'à broyer les CVK afin d'éviter ces inconvénients.

De façon étonnante, il n'existe pas de relation entre la teneur en CaO libre et le gonflement. En effet, le CaO libre forme un produit plus volumineux en s'hydratant. Cependant, les CVK ayant la plus forte teneur en CaO libre sont celles ne montrant pas de gonflement. Il serait intéressant de comprendre pourquoi. La finesse du CaO libre joue peut-être un rôle. Le CaO libre des CVK montrant peu de gonflement était peut-être plus fin et s'est donc hydraté avant la fin de la prise. De cette façon, le gonflement a pu être évité.

Deux des SP étudiés accentuent les gonflements et microfissures observés. Les raisons de cette incompatibilité sont encore inconnues et il serait intéressant de les connaître afin de pouvoir formuler une recommandation claire sur les SP à éviter en présence de CVK.

Les performances de résistances à la compression des CVK semblent avoir un lien avec la quantité de CaO libre. Tout porte donc à croire que son hydratation participe au gain de résistance des bétons avec CVK. D'ailleurs, il est connu que l'hydratation de la chaux se fait assez rapidement, ce qui explique que les résistances soient plus importantes à jeune âge pour les bétons avec CVK. Cependant, les perméabilités aux ions chlore montrent un comportement inverse. Les performances des bétons avec CVK sont meilleures à 91 jours qu'à 28 jours. Il y a donc un autre phénomène qui fait en sorte d'améliorer les performances à long terme des CVK. Une étude de l'évolution des produits d'hydratations permettrait sans doute de comprendre pourquoi.

La dernière phase de l'étude portait sur les mélanges ternaires et ce qu'ils pouvaient apporter en termes de robustesse des CVK. Les résultats montrent qu'une combinaison de CVK et CVF est la plus optimale. Cependant, cette étude n'a pas été faite avec toutes les CVK. Il pourrait être intéressant d'étendre l'étude aux six CVK en variant les proportions de CVK et de CVF. Il sera alors peut-être possible de diminuer de façon importante la quantité de ciment utilisée. De plus, il serait intéressant d'étudier plus de paramètres, comme la résistance aux cycles de gel-dégel, puisque ces bétons sont destinés à être utilisés au Québec.

Finalement, afin de rencontrer les spécifications de la norme CSA pour les ACA, il serait nécessaire de faire des bétons avec air entraîné avec tous les essais nécessaires pour répondre à la norme. D'ailleurs, l'entraînement de l'air pourrait être un défi et un choix optimal de l'AEA à utiliser sera probablement à faire.

# ANNEXE A

## FORMULATIONS CORRIGÉES

Les tableaux suivants présentent les formulations corrigées en fonction des masses volumiques réelles mesurées au laboratoire à 10 minutes pour tous les bétons effectués. Le Tableau A.1 présente les formulations corrigées de la phase I-A, le Tableau A.2 présente les formulations corrigées de la phase I-B, le Tableau A.3 présente les formulations corrigées de la phase I-C, le Tableau A.4 présente les formulations corrigées de la phase II et finalement, le Tableau A.5 présente les formulations corrigées de la phase III.

**Tableau A.1 : Formulations corrigées des mélanges de la phase I-A**

E/C	Mélanges	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	SP (kg/m <sup>3</sup> )
0,55	Témoin	196	355	-	772	1087	0,9	-
	20% CVK 4	196	286	71	762	1091	1,3	0,40
0,4	Témoin	162	406	-	814	1086	1,5	0,82
	20% CVK 4	162	325	81	804	1086	1,3	1,50

**Tableau A.2 : Formulations corrigées des mélanges de la phase I-B**

E/L	Mélanges	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	SP (kg/m <sup>3</sup> )	AEA (kg/m <sup>3</sup> )
0,55	Témoin	187	340	-	622	1038	8,4	-	0,25
	20% CVK 4	185	269	67	611	1026	8,4	0,28	0,18
0,4	Témoin	158	396	-	676	1058	6,6	0,65	0,07
	20% CVK 4	156	311	78	659	1040	7,2	1,14	0,35

**Tableau A.3 : Formulations corrigées des mélanges de la phase I-C**

E/L	Mélanges	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	SP (kg/m <sup>3</sup> )
0,55	Témoin	194	354	-	768	1081	1,0	-
	20% CVC	194	283	71	759	1080	0,9	-
	20% CVF	194	283	71	759	1080	0,8	-
	20% CVK 1	191	278	70	743	1063	2,3	0,53
	20% CVK 2	195	283	71	755	1082	1,5	0,32
	20% CVK 3	193	280	70	744	1070	1,9	0,31
	20% CVK 4	193	280	70	753	1072	1,9	0,37
0,4	Témoin	160	400	-	803	1071	1,5	0,81
	20% CVC	159	318	79	788	1062	1,5	0,69
	20% CVF	160	320	80	794	1071	1,7	0,71
	20% CVK 1	160	321	80	789	1072	0,9	2,01
	20% CVK 2	161	322	81	792	1078	1,5	1,17
	20% CVK 3	161	323	81	790	1078	1,1	1,15
	20% CVK 4	163	326	82	808	1091	1,5	1,39
	20% CVK 5	161	322	80	801	1077	1,6	0,97
	20% CVK 6	161	322	80	794	1076	1,4	0,88

**Tableau A.4 : Formulations corrigées des mélanges de la phase II**

SP	Mélanges	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Cendre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	SP (kg/m <sup>3</sup> )
Plastol 5000	Témoin	160	400	-	803	1071	1,5	0,81
	20% CVK 1	160	321	80	789	1072	0,9	2,01
	20% CVK 4	163	326	82	808	1091	1,5	1,39
Viscocrete 2100	Témoin	161	402	-	806	1075	1,5	0,70
	20% CVK 1	160	320	80	789	1071	0,6	1,69
	20% CVK 4	162	325	81	804	1085	0,9	1,32
Adva 405	Témoin	160	400	-	802	1071	1,7	0,92
	20% CVK 1	162	324	81	796	1082	1,1	2,12
	20% CVK 4	161	322	81	796	1077	1,8	2,13
Glenium 7102	Témoin	161	402	-	805	1076	1,4	1,19
	20% CVK 1	162	324	81	795	1082	1,2	2,70
	20% CVK 4	162	325	81	802	1086	1,1	2,33

Tableau A.5 : Formulations corrigées des mélanges de la phase III

CVK	Mélanges	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	CVK (kg/m <sup>3</sup> )	CVF (kg/m <sup>3</sup> )	FS (kg/m <sup>3</sup> )	MK (kg/m <sup>3</sup> )	L (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat 20mm (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	SP (kg/m <sup>3</sup> )
CVK 1	Témoin	163	407	-	-	-	-	-	816	1089	1,4	0,77
	20% CVK	163	325	81	-	-	-	-	801	1088	1,4	1,85
	20% CVF	160	320	-	80	-	-	-	794	1071	1,7	0,71
	10% CVK+10% CVF	162	324	41	41	-	-	-	801	1084	1,4	1,25
	20% CVK+5% FS	164	307	82	-	20	-	-	799	1094	1,5	2,23
	20% CVF+5% FS	161	301	-	80	20	-	-	779	1075	1,9	0,75
	20% CVK+8% MK	162	292	81	-	-	32	-	791	1083	1,8	1,81
	20% CVK+25% L	160	221	80	-	-	-	100	784	1073	1,7	1,76
CVK 4	Témoin	163	407	-	-	-	-	-	816	1089	1,4	0,77
	20% CVK	163	326	82	-	-	-	-	808	1091	1,5	1,39
	20% CVF	160	320	-	80	-	-	-	794	1071	1,7	0,71
	10% CVK+10% CVF	161	323	40	40	-	-	-	800	1079	1,6	0,90
	20% CVK+5% FS	161	303	81	-	20	-	-	790	1080	1,7	1,57
	20% CVF+5% FS	161	301	-	80	20	-	-	779	1075	1,9	0,75
	20% CVK+8% MK	163	293	82	-	-	33	-	796	1090	1,3	1,41
	20% CVK+25% L	162	223	81	-	-	-	101	793	1083	1,5	1,19



# LISTE DES RÉFÉRENCES

- Aitcin, P.-C. (2008). Binders for durable and sustainable concrete, 1ere édition. Taylor & Francis, New York, États-Unis, 500 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1996). Use of Fly ash in concrete, 41 p. (Norme ACI 232.2R-96).
- Anthony, E.J., Berry, E.E., Blondin, J., Bulewicz, E.M. et Burwell, S. (2003). Advanced ash management technologies for CFBC ash. Waste Management, vol. 23, n° 6, p. 503-516.
- Anthony, E.J., Bulewicz, E.M., Dudek, K. et Kozak, A. (2002). The long term behaviour of CFBC ash-water systems. Waste Management, vol. 22, n° 1, p. 99-111.
- Anthony, E.J., Iribarne, A.P. et Iribarne, J.V. (1997). The characterization of solid residues from PFBC boilers. Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 75, n° 6, p. 1115-1121.
- ASTM International (2004). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. ASTM International, 9 p. (Norme ASTM C231-04).
- ASTM International (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, 7 p. (Norme ASTM C39/C39M-05).
- ASTM International (2009). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International, 7 p. (Norme ASTM C1202-09).
- ASTM International (2005). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, 4 p. (Norme ASTM C143/C143M-05a).
- ASTM International (2001). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM International, 4 p. (Norme ASTM C138/C138M-01a).
- ASTM International (2004). Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, 3 p. (Norme ASTM C1064/C1064M-04).
- ASTM International (2004). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. ASTM International, 3 p. (Norme ASTM C566-97).
- ASTM International (1999). Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. ASTM International, 6 p. (Norme ASTM C403-99).
- ASTM International (2002). Standard Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, 8 p. (Norme ASTM C192/C192M-02).

- ASTM International (2010). Standard Test Method for Capping Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, 6 p. (Norme ASTM C617-10).
- Ayrinhac, F. (2008). *Valorisation des cendres volantes de Chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil*. (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France. 180 p.
- Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S. et Lewis, M.H. (2003). Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 8, p. 1189-1202.
- Baker, M.D. et Laguros, J.G. (1986). FLY ASH AND COAL CONVERSION BY-PRODUCTS: CHARACTERIZATION, UTILIZATION AND DISPOSAL I. Edited by McCarthy, G.J. et Lauf, R.J., Pittsburgh, PA, USA, Materials Research Society Symposia Proceedings, vol. 43, p. 73-84.
- Behr-Andres, C. et Hutzler, N.J. (1994). Characterization and use of fluidized-bed-combustion coal ash. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 120, n° 6, p. 1488-1506.
- Biermann, J., Voogt, N. et Valk, M. (1997). Thermal Conversion of Deinking Sludge to Valuable Cement Products. *VDI Berichte*, numéro 1313, p. 251-251.
- Bisogni Jr., J. J., Dick, R. I., Hover, K. C., Bierck, B. R. et Natesaiyer, K. (1990). Properties of sludge incinerator ash-mixture. Dans *Proceedings of the 1990 Specialty Conference, July 8, 1990 - July 11*. Publ by ASCE, Arlington, VA, USA, p. 683-690.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2002). Bétons de masse volumique normale et constituants. 5<sup>e</sup> édition. 37 p. (Norme NQ 2621-900)
- Carette, G. G. et Malhotra, V. M. (1987). Characterization of Canadian fly ashes and their relative performance in concrete. *Canadian journal of civil engineering*, volume 14, numéro 5, p. 667-682.
- Canadian Standards Association (CSA). (2008a). Standard practice for the evaluation of alternative supplementary cementing materials for use in concrete (A3004-E1). Dans *Cementitious materials compendium (A3000-08)*. Mississauga, Canada, 3<sup>e</sup> édition, p. 147-156. (Norme CSA A3004-E1).
- Canadian Standards Association (CSA). (2008b). Cementitious materials for use in concrete (A3001-08). Dans *Cementitious materials compendium (A3000-08)*. Mississauga, Canada, 3<sup>e</sup> édition, p. 147-156. (Norme CSA A3001-08).
- Canadian Standards Association (CSA). (2009). Concrete materials and methods of concrete construction (A23.1-09). Dans *Concrete and reinforced concrete (A23)*. Canada, 11<sup>e</sup> édition, 582 p. (Norme CSA A23.1-09).

- Canadian Standards Association (CSA). (2009b). Test methods and standard practices for concrete (A23.2-09). Dans *Concrete and reinforced concrete (A23)*. Canada, 11<sup>e</sup> édition, 582 p. (Norme CSA A23.2-09).
- Chaipanich, A., Bai, J., O'Farrell, M., Kinuthia, J. M., Sabir, B. B. et Wild, S. (2005). Setting time and heat of hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended cements. Dans *2005 International Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, July 5, 2005 - July 7*. Thomas Telford Services Ltd, Dundee, Scotland, United kingdom, p. 825-834.
- Elayadi, D. (2006). *Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeteries*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France. 124 p.
- Fajun, W., Grutzeck, M.W. et Roy, D.M. (1985). RETARDING EFFECTS OF FLY ASH UPON THE HYDRATION OF CEMENT PASTES: THE FIRST 24 HOURS. *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n° 1, p. 174-184.
- Freeman, E., Gao, Y., Hurt, R. et Suuberg, E. (1997). Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air-entraining admixtures for concrete. *Fuel*, vol. 76, n° 8, p. 761-765.
- Frias, M. et Banfill, P. (2007). Rheology and conduction calorimetry of cement modified with calcined paper sludge. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 2, p. 184-90.
- Frias, M., Garcia, R., Vigil, R. et Ferreiro, S. (2008a). Calcination of art paper sludge waste for the use as a supplementary cementing material. *Applied Clay Science*, volume 42, numéro 1-2, p. 189-193.
- Frias, M., Rodriguez, O., De Rojas, M. I. S., Nebreda, B., Vegas, I., Urreta, J., Garcia, R. et Vigil, R. (2008b). Reuse of waste paper sludge as supplementary cementing material. Dans *2008 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, REWAS 2008, October 12, 2008 - October 15*. Minerals, Metals and Materials Society, Cancun, Mexico, p. 1499-1506.
- Gaglia, B.N. et Hall, A. (1987). Comparison of bubbling and circulating fluidized bed industrial steam generation. In Anonyme, *FBC comes of age: proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion, May 3-7, 1987*. (p. 18-25). Boston, MA, USA, Publ by ASME.
- Garcia, R., Vigil de, I. V., Vegas, I., Frias, M. et de Rojas, M. I. S. (2008). The pozzolanic properties of paper sludge waste. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 7, p. 1484-90.
- Grutzeck, M.W., Fajun, W. et Roy, D.M. (1986). FLY ASH AND COAL CONVERSION BY-PRODUCTS: CHARACTERIZATION, UTILIZATION AND DISPOSAL I. Edited by McCarthy, G.J. et Lauf, R.J., Pittsburgh, PA, USA, Materials Research Society Symposia Proceedings, vol. 43, p. 65-72.

- Habert, G. et Roussel, N. (2008). Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental? Dans *XXVI<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, 4-6 Juin 2008*. Nancy, France, 9p.
- Hill, R.L., Sarkar, S.L., Rathbone, R.F. et Hower, J.C. (1997). An examination of fly ash carbon and its interactions with air entraining agent. *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 2, p. 193-204.
- Jahn, P. et Weis, P. (1990). Research on the utilization of circulating fluidized bed combustion ashes. In Anonyme, *1990 International Joint Power Generation Conference, October 21-October 25, 1990*. (p. 27-34). Boston, MA, USA, Publ by ASME.
- Joshi, R.C. et Malhotra, V.M. (1986). FLY ASH AND COAL CONVERSION BY-PRODUCTS: CHARACTERIZATION, UTILIZATION AND DISPOSAL II. Edited by McCarthy, G.J., Glasser, F.P. et Roy, D.M., Pittsburgh, PA, USA, Materials Research Society Symposia Proceedings, vol. 86, p. 167-170.
- Kamon, M. et Katsumi, T. (1995). Utilization of coal fly ash from fluidized bed combustion systems. In Anonyme, *Part 1 (of 2), February 24- February 26, 1995*. (p. 1765-1779), Proceedings of the Specialty Conference on Geotechnical Practice in Waste Disposal, 1995. New Orleans, LA, USA, ASCE.
- Khayat, K.H., Yahia, A. et Sayed, M. (2008). Effect of supplementary cementitious materials on rheological properties, bleeding, and strength of structural grout. *ACI Materials Journal*, vol. 105, n° 6, p. 585-593.
- Kinuthia, J. M., O'Farrell, M., Sabir, B. B. et Wild, S. (2001). A preliminary study of the cementitious properties of wastepaper sludge ash ground granulated blast-furnace slag (WSA-GGBS) blends. Dans *Recovery and recycling of paper*. Thomas Telford Ltd, London, p. 93-104.
- Kosmatka, S. H., et autres. (2003). *Dosage et Contrôle des Mélanges de Béton, EB101, 7e édition*, Association Canadienne du Ciment, Ottawa, Ontario, Canada, 368 p.
- Kruger. (2003). Avis de projet présenté à la Direction des évaluations environnementales du MDDEP; Cogénération à la biomasse à l'Usine Kruger-Brompton à Sherbrooke. 14 p.
- Kruger. (2004). Étude d'impact sur l'environnement déposée au Ministre de l'Environnement; Projet de cogénération à la biomasse, Usine Kruger Brompton. 155 p.
- Kruger. (2005a). *Brochure institutionnelle 2005*. [En ligne]. [http://www.kruger.com/imports/pdf/fr/KRUGER\\_104\\_Broch\\_Fra.pdf](http://www.kruger.com/imports/pdf/fr/KRUGER_104_Broch_Fra.pdf) (Page consultée le 29 avril 2009).
- Kruger. (2005b). *Cogénération dans la mire*. [En ligne]. <http://www.kruger.com/imports/pdf/fr/BromptonProjetcogeneration.pdf> (Page consultée le 29 avril 2009).

- Kruger. (2005c). Rapport d'analyse environnementale présenté à la Direction des évaluations environnementales du MDDEP; Projet de cogénération à la biomasse à l'usine Kruger Brompton à Sherbrooke. 32 p.
- Latva-Somppi, J. (1998a). *Experimental studies on pulp and paper mill sludge ash behavior in fluidized bed combustors*. (Doctoral's thesis). University of technology, Espoo, Finland. 90 p.
- Latva-Somppi, J., Kauppinen, E.I., Valmari, T., Ahonen, P., Gurav, A.S., Kodas, T.T. et Johanson, B. (1998b). Ash formation during co-combustion of wood and sludge in industrial fluidized bed boilers. *Fuel Processing Technology*, vol. 54, n° 1-3, p. 79-94.
- Latva-Somppi, J., Moisio, M., Kauppinen, E.I., Valmari, T., Ahonen, P., Tapper, U. et Keskinen, J. (1998c). Ash formation during fluidized-bed incineration of paper mill waste sludge. *Journal of Aerosol Science*, vol. 29, n° 4, p. 461-480.
- Li, F., Zhai, J., Fu, X. et Sheng, G. (2006). Characterization of fly ashes from circulating fluidized bed combustion (CFBC) boilers cofiring coal and petroleum coke. *Energy and Fuels*, vol. 20, n° 4, p. 1411-1417.
- Maenami, H., Isu, N., Ishida, E.H. et Mitsuda, T. (2004). Electron microscopy and phase analysis of fly ash from pressurized fluidized bed combustion. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 5, p. 781-788.
- Massazza, F. (1991). Hydration and setting of cements. Proceedings of the International RILEM Workshop on Hydration and Setting (p. 393-412), Université de Bourgogne, Dijon, France.
- Miller, B. et Tillman, D. (2008). *Combustion engineering issues for solid fuel systems*. Academic Press, États-Unis, 528 p.
- Mozaffari, E., Kinuthia, J. M., Bai, J. et Wild, S. (2009). An investigation into the strength development of Wastepaper Sludge Ash blended with Ground Granulated Blastfurnace Slag. *Cement and Concrete Research*, volume 39, numéro 10, p. 942-949.
- O'Farrell, M., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., Sabir, B.B., Wild, S. (2002). A new concrete incorporating wastepaper sludge ash (WSA). *Challenges of Concrete Construction International Congress, University of Dundee, 5 au 11 septembre 2002, Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction, Theme 1 – Developments in Concrete Constituent Materials*. Thomas Telford Ltd, London, p. 149-158.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Amahjour, F., Girbes, I., Velazquez, S. et Ordonez, L. M. (2002). Advantages in the use of fly ashes in cements containing pozzolanic combustion residues: Silica fume, sewage sludge ash, spent fluidized bed catalyst and rice husk ash. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, volume 77, numéro 3, p. 331-335.

- Pera, J. et Amrouz, A. (1998). Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. *Advanced Cement Based Materials*, volume 7, numéro 2, p. 49-56.
- Pera, J. et Ambroise, J. (1999). Transformation of paper sludge into a value-added admixture for concrete. Dans *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (REWAS 1999)*, volume 1. Minerals, Metals and Materials Society, San Sebastian, Spain, p. 381-389.
- Pera, J. et Ambroise, J. (2000). Properties of calcined paper sludge. Dans *Sustainable construction: Use of incinerator ash*. Edited by Dhir, R.K., Dyer, T.D. et Paine, K.A. Thomas Telford Ltd, London, p. 405-414.
- Plowman, C. et Cabrera, J.G. (1981). INFLUENCE OF PULVERISED FUEL ASH ON THE HYDRATION REACTIONS OF CALCIUM ALUMINATES. In *Effects of Fly ash Incorporation in Cement and Concrete, Proceedings, Symposium N* (p. 71-81), Materials Research Society Annual Meeting. University Park, Pa, USA, Mater Res Soc.
- Rabehi, B. et Ghernouti, Y. (2009). RECUPERATION ET VALORISATION DE LA BOUE DE PAPETERIE COMME AJOUT DANS LES MORTIER. Dans *1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique (ENSET), Oran, Algérie, October 12-14, volume 3, p. 101-108.
- Rajczyk, K., Giergiczy, E. et Glinicki, M.A. (2004). Use of DTA in the investigations of fly ashes from fluidized bed boilers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 77, n° 1, p. 165-170.
- Rodriguez, O., Frias, M. et De Rojas, Ma I. Sanchez (2008). Influence of the calcined paper sludge on the development of hydration heat in blended cement mortars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, volume 92, numéro 3, p. 865-871.
- Roy, D.M., Luke, K. et Diamond, S. (1986). FLY ASH AND COAL CONVERSION BY-PRODUCTS: CHARACTERIZATION, UTILIZATION AND DISPOSAL I. Edited by McCarthy, G.J. et Lauf, R.J., Pittsburgh, PA, USA, Materials Research Society Symposia Proceedings, vol. 43; p. 3-20.
- Sanders, J. P. et Gallagher, P. K. (2002). Kinetic analyses using simultaneous TG/DSC measurements: Part I: decomposition of calcium carbonate in argon. *Thermochimica Acta*, volume 388, numéro 1-2, p. 115-128.
- Sivasundaram, M. (2000). *Glass ceramics from pulp and paper waste ash*. Mémoire de maîtrise, Université McGill, Montréal, Canada. 108 p.
- Soh, Y. S., Soh, S. Y. et Lee, D. S. (1995). Use of paper sludge ash in concrete products. Dans *Proceedings of the International RILEM Workshop on Disposal and Recycling of Organic and Polymeric Construction Materials*. E. & F.N. Spon, Tokyo, Japan, p. 271-271.

- Tagnit-Hamou, A. (1995). Microstructure et physicochimie des ciments et des bétons. Note de cours, GCI-712, Université de Sherbrooke.
- Vegas, I., Urreta, J., Frias, M. et Garcia, R. (2009a). Freeze-thaw resistance of blended cements containing calcined paper sludge. *Construction and Building Materials*, volume 23, numéro 8, p. 2862-2868.
- Vegas, I., Urreta, J., Frias, M., Rodriguez, O., Ferreiro, S., Nebreda, B., Garcia, R., Vigil, R. (2009b). Engineering properties of cement mortars containing thermally activated paper sludge. Dans *Wascon 09 Symposium*. 3-5 Juin 2009. Lyon, France, 11p.
- Vigil de la Villa, R., Frias, M., Sánchez de Rojas, M. I., Vegas, I. et García, R. (2007). Mineralogical and morphological changes of calcined paper sludge at different temperatures and retention in furnace. *Applied Clay Science*, volume 36, numéro 4, p. 279-286.
- Xie, A. (2009). *Characteristics of Wastepaper Sludge Ash and its Potential Applications in Concrete*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 179 p.