

Table des matières

Résumé.....	III
Abstract	V
Liste des tableaux.....	XI
Liste des figures.....	XIII
Remerciements	XVII
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Introduction générale	1
1.2 Spécificité de l'étude et objectifs.....	3
1.3 Présentation du document.....	4
Chapitre 2 Revue de documentation.....	5
2.1 Introduction.....	5
2.2 Du réchauffement climatique au ciment.....	5
2.3 La disponibilité du verre comme remplacement cimentaire.....	9
2.4 Valorisation d'autres matériaux dans le béton	9
2.4.1 Laitier de haut fourneau.....	10
2.4.2 La fumée de silice.....	10
2.4.3 Cendres volantes.....	11
2.5 Rhéologie des bétons avec verre.....	12
2.5.1 L'angularité et la densité des particules	12
2.5.2 La dimension des particules	14
2.6 Technologie du béton projeté par voie sèche.....	15
2.7 Béton projeté par voie sèche et rebond	19
2.7.1 Mécanisme de rebond.....	19
2.7.2 Rapport E/C.....	20
2.7.3 Accélérateur.....	22
2.7.4 Consistance, cohésion et adhérence	22
2.8 Béton projeté par voie sèche et rebond	22
2.9 Conclusion.....	23
Chapitre 3 Programme expérimental	25
3.1 Introduction	25
3.2 Équipement de projection	25
3.2.1 Machine à projection	25
3.2.2 Lance longue	26
3.2.3 Lance courte	27
3.2.4 Système d'acquisition des données des paramètres de projection	27
3.3 Campagne d'exploration - Phase 1	28

3.3.1	Matériaux	28
3.3.2	Mélanges	30
3.3.3	Essais.....	31
3.3.4	Ajustement des mélanges lors de la projection.....	40
3.3.5	Observations préliminaires	42
3.4	Campagne de validation pour usage en ingénierie - Phase 2.....	42
3.4.1	Matériaux	42
3.4.2	Mélanges	43
3.4.3	Essais.....	45
Chapitre 4	Présentation des résultats.....	49
4.1	Phase 1	49
4.1.1	Composition en place.....	49
4.1.2	Rebond	50
4.1.3	Consistance mesurée au pénétromètre	51
4.1.4	Étalement latéral	51
4.1.5	Résistance en compression	52
4.1.1	Masse volumique, absorption, et volume de pores perméables.....	53
4.2	Phase 2	56
4.2.1	Composition en place.....	56
4.2.2	Résistance en compression	56
4.2.3	Résistance aux cycles de gel dégel - Mélanges non accélérés.....	57
4.2.4	Résistance à l'écaillage - Mélanges non accélérés	58
4.2.5	Masse volumique, absorption et volume de pores perméables.....	59
4.2.6	Étalement latéral	60
4.2.7	Résistance en compression en jeune âge - Mélanges accélérés.....	60
Chapitre 5	Analyse des résultats.....	61
5.1	Introduction	61
5.2	Demande en eau des mélanges.....	61
5.2.1	Contribution du taux de remplacement sur la quantité d'eau en place (kg/m ³)	62
5.2.2	Influence de la perception du lancier sur la quantité d'eau en place (kg/m ³) ...	62
5.2.3	Rapport E/L.....	63
5.3	Consistance et influence du rapport E/L.....	64
5.4	Rebond Phase 1	65
5.4.1	Rebond par rapport à la notion de consistance	65
5.4.2	Conclusion partielle sur le rebond	66
5.4.3	Cas particulier de PV20	66
5.5	Rebond Phase 2.....	66
5.5.1	Impact de l'accélérateur de prise sur le rebond	67
5.5.2	Impact du dosage du verre sur le rebond	67
5.6	Étalement latéral.....	68

5.7 Résistances en compression par rapport à la composition en place.....	68
5.7.1 Résistance en compression à 28 jours pour différents ajustements.....	68
5.7.2 Conclusion partielle.....	72
5.8 Évolution de la résistance en compression.....	73
5.9 Résistance en compression et accélérateur de prise.....	74
5.10 Comparaison entre les critères de l'industrie minière et les résistances en compression obtenues	75
5.11 Discussion et comparaison entre les critères de génie civil et les résultats en lien avec la durabilité.....	76
Chapitre 6 – Conclusion.....	79
6.1 Introduction.....	79
6.2 Conclusions au regard des objectifs de recherche	79
6.2.1 Étudier l'effet de la poudre de verre comme ajout cimentaire sur la composition en place.....	79
6.2.2 Étudier l'effet de la poudre de verre sur le comportement rhéologique du béton projeté 80	
6.2.3 Suivre l'évolution de la résistance en compression dans le temps.....	80
6.2.4 Étudier la présence de poudre de verre sur le rebond.....	81
6.2.5 Vérifier si les bétons projetés par voie sèche permettent d'atteindre les exigences de durabilité pour une utilisation dans un contexte de génie civil.....	82
6.2.6 Vérifier si les bétons projetés par voie sèche permettent d'atteindre les exigences pour une utilisation dans le contexte de l'industrie minière.....	82
6.3 Conclusion sur le potentiel général de la poudre de verre en béton par voie sèche.....	82
6.4 Piste de recherches futures.....	84
BIBLIOGRAPHIE	85
Annexe A.....	89
Fiches Techniques et signalétiques.....	89
Annexe B.....	107
Granulométries	107
Annexe C.....	111
Résultats intermédiaires.....	111

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Matériaux utilisés pour la phase expérimentale.....	29
Tableau 3.2 : Caractéristiques principales des liants utilisés.....	29
Tableau 3.3 : Composition en pourcentage massique du liant pour les différents mélanges	30
Tableau 3.4 : Composition en pourcentage massique des mélanges secs de la phase 1.....	30
Tableau 3.5 : Composition par mètre cube pour un rapport E/L théorique de 0,40.....	31
Tableau 3.6 : Densité des différents liants.....	31
Tableau 3.7 : Critères de qualité de Morgan.....	39
Tableau 3.8 : Synthèse de la démarche expérimentale de la phase 1.....	41
Tableau 3.9 : Matériaux de la phase 2.....	43
Tableau 3.10 : Caractéristiques principales des liants utilisés.....	43
Tableau 3.11 : Compositions des liants utilisés dans les différents mélanges.....	44
Tableau 3.12 : Composition en proportions massiques des mélanges secs.....	44
Tableau 3.13 : Composition théorique des mélanges pour un rapport E/L de 0,40.....	44
Tableau 3.14 : Synthèse de la démarche expérimentale de la phase 2.....	47
Tableau 4.1 : Composition en place des mélanges en fonction des ajustements.....	50
Tableau 4.2 : Rebond en fonction des mélanges et ajustements.....	50
Tableau 4.3 : Résistance à la pénétration des différents mélanges et différents ajustements	51
Tableau 4.4 : Étalement latéral en fonction des mélanges et ajustements.....	51
Tableau 4.5 : Résistance en compression à 7,28 et 90 jours.....	52
Tableau 4.6 : Absorption en fonction des mélanges et ajustements.....	53
Tableau 4.7 : Volumes de pores perméables en fonction des mélanges et ajustements (Essai ASTM C642).....	54
Tableau 4.8 : Masse volumique des différents mélanges en fonction de l'ajustement.....	55
Tableau 4.9 : Composition effective après projection.....	56
Tableau 4.10 : Résistances en compression à 7 et 28 jours pour les mélanges non accélérés	57
Tableau 4.11 : Résistance en compression des mélanges accélérés à 3, 7 et 28 jours.....	57
Tableau 4.12 : Évolution des modules d'élasticité dynamiques des mélanges non accélérés au cours des essais de gel-dégel (ASTM C666).....	57
Tableau 4.13 : Résultats des essais d'absorption des mélanges de la phase 2.....	59
Tableau 4.14 : Résultats de mesure de rebond des mélanges accélérés et non accélérés.....	59
Tableau 4.15 : Étalement latéral des mélanges de la phase 2.....	60
Tableau 4.16 : Résistance en compression à jeune âge des mélanges accélérés.....	60

Liste des figures

Figure 2.1 : Émissions de carbone de l'industrie cimentaire (Rehan et Nehdi 2005).....	7
Figure 2.2 : Évolution du pourcentage de clinker dans le ciment (WBCSD-CSI 2009).....	8
Figure : 2.3 Schéma d'une machine à projeter par voie sèche	16
Figure 2.5 : Impact entre le granulats et le substrat (Jolin 1999).....	20
Figure 2.6 : Rebond en fonction du rapport E/C (Pfeuffer et Kusterle 2001)	21
Figure 2.7 : Rebond en fonction du débit d'eau (Jolin 1999).....	21
Figure 3.1 : Machine de projection par voie sèche de l'université Laval (Bolduc 2009)	26
Figure 3.2 : Lance longue avec embout de type <i>hydromix</i>	26
Figure 3.3 : Lance courte et embout en forme de doubles bulles	27
Figure 3.4 : Système d'acquisition de données du laboratoire de béton projeté	28
Figure 3.5 : Lavage des granulats (Bolduc 2009).....	32
Figure 3.6 : Pénétromètre de l'université Laval	34
Figure 3.7 : Résultat typique de pénétromètre et interprétation du graphique	35
Figure 3.8 : Résultat typique servant au calcul de la valeur de rebond	36
Figure 3.9 : Panneau de mesure d'étalement latéral avant et pendant une projection	37
Figure 3.10 : Schéma typique du montage d'étalement latéral après projection	38
Figure 3.11 : Montage d'étalement latéral après projection et traitement d'image.....	38
Figure 3.12 : a) Panneau lors d'une projection, b) Carottage de cylindres, et c) Cylindres surfacés.....	39
Figure 3.13 : Montage pour la mesure de résistance en compression à jeune âge	45
figure 3.14 : Schéma de l'échantillon après rupture.....	46
Figure 4.1 : Rebond en fonction des mélanges et ajustements	50
Figure 4.2 : Résistance à la pénétration des différents mélanges et ajustements.....	51
Figure 4.3 : Étalement latéral en fonction des mélanges et ajustements	52
Figure 4.4 : Résistances en compression à 7,28 et 90 jours en fonction des ajustements	53
Figure 4.5 : Absorption en fonction des mélanges et ajustements.....	53
Figure 4.6 : Volume de pores perméables en fonction des mélanges et ajustements (Essai ASTM C642).....	55
Figure 4.7 : Masses volumiques en fonction des mélanges et ajustements	55
Figure 4.8 : Résultats de l'essai de résistance à l'écaillage des mélanges non accélérés (NQ 2621-900/2002)	58
Figure 4.9 : Résultats de mesure de rebond des mélanges accélérés et non accélérés	60
Figure 5.1 : Masse d'eau et rapport E/L des différents mélanges à ajustement idéal	62
Figure 5.2 : Schéma du comportement s'apparentant à de la thixotropie.....	63
Figure 5.3 : Teneur en liant et rapport E/L des différents mélanges	64
Figure 5.4 Relation entre le rapport E/L et la Consistance (MPa).....	65
figure 5.5 : Rebond en fonction de l'ajustement pour différents mélanges.....	66
Figure 5.6 : Mesure de rebond des mélanges avec et sans accélérateur	67
Figure 5.7 : Étalement latéral des différents mélanges en fonction des ajustements.....	68

Figure 5.8 : Résistance en compression à 28 jours des différents mélanges à différent ajustement	69
Figure 5.9 : Résistance en compression des différents mélanges en fonction du rapport E/L	69
Figure 5.10 : Masse des constituants du mélange de référence en fonction des ajustements	70
Figure 5.11 : Masse des constituants du mélange FS10 en fonction des ajustements	71
Figure 5.12 : Composition en place du mélange PV20 en fonction des ajustements	71
Figure 5.13 : Composition en place du mélange PV10FS10 en fonction des ajustements ..	72
Figure 5.14 : Résistance en compression à 7, 28 et 90 jours.....	73
Figure 5.15 : Évolution de la résistance en compression des différents mélanges en fonction des ajustements	74
Figure 5.16 : Évolution de la résistance en compression des mélanges accélérés	75
Figure 5.17 : Résistances en compression des mélanges accélérés par rapport aux critères de l'industrie minière.....	75
Figure 5.18 : Aspect des éprouvettes à la fin de l'essai d'écaillage pour le mélange a) FS10 b) PV20FS10 avec le scellement et c) PV20FS10 après le retrait du scellement.....	77
Figure 5.19 : Schéma d'une projection dans un moule restreint où le béton est moins riche en mortier en périphérie	77
Figure 5.20 : Résultat de l'essai d'écaillage des mélanges FS10 et PV20FS10	78

*À ma famille, mon amour, mes amis, mes
collègues. Je vous dédie cet ouvrage en vous
remerciant du fond du cœur.*

Remerciements

Ce projet de recherche a été une expérience marquante dont je me souviendrai certainement tout au long de ma vie. Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de recherche Marc Jolin de m'avoir vendu l'aventure du béton projeté! Son enthousiasme contagieux a su me motiver à accomplir ce projet, le mener à terme, mais surtout à me l'approprier. J'ai beaucoup d'admiration pour la manière avec laquelle mon directeur et mon mentor pour quelques expériences d'enseignement transmet aux gens le plaisir d'être un expert dans son domaine et de partager des connaissances qui font avancer le monde. Je le remercie pour toutes les conférences auxquelles il nous a donné la chance d'assister, car c'est au fil de ces expériences que j'ai eu le sentiment d'avoir trouvé ma voie. En plus d'avoir été inspirant comme ingénieur et comme pédagogue, j'ai eu la chance d'avoir eu un directeur qui a toujours su trouver des disponibilités aux moments critiques. Plus que tout, Marc, je te remercie pour tout le cœur que tu mets à maintenir tes étudiants aussi motivés que toi dans tous les projets principaux et secondaires de la maîtrise. Je suis très chanceuse d'avoir pu vivre l'aventure de la maîtrise avec le directeur que j'ai eu!

Mon codirecteur, le professeur Tagnit-Hamou aura, lui aussi, grandement contribué au succès du projet. D'abord, son implication a permis des échanges des plus pertinents et agréables avec les étudiants de l'université de Sherbrooke, ce qui continue de renforcer les liens d'amitié entre deux universités du C.R.I.B. Je suis également reconnaissante à mon codirecteur de m'avoir autant instruit à propos de mon sujet, son expertise est accessible, et c'est un excellent pédagogue. Aussi, Professeur Tagnit-Hamou, j'ai beaucoup d'admiration pour la patience, l'amabilité et le souci constant d'un travail bien accompli dont vous faites preuve. Votre ouverture d'esprit face aux technologies novatrices et votre engagement pour faire progresser les matériaux dans une direction considérant davantage l'environnement m'ont inspirée et encouragée à continuer dans cette voie. Encore une fois, je me considère chanceuse d'avoir côtoyé un individu qui m'aura autant inspirée sur le plan professionnel et personnel.

Je remercie mes collègues pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons eues, les moments inoubliables lors des conférences, les bières du vendredi après-midi, les séances de vélo, les concours de dessins et surtout pour les sourires et les fous rires qui ont été échangés quotidiennement au bureau (Pissot, Félix-Antoine, les deux J-S, les deux Seb et la belle Roxanne). L'ambiance du bureau a su contribuer significativement au plaisir de rentrer travailler tous les matins! Tony et Alexandre, mes amis du club select *team fin de semaine*, merci de votre joyeuse compagnie et votre support sur les derniers miles. Vous avez apporté une touche humaine qui fait de ce projet une œuvre complète à mes yeux. Je vous suis infiniment reconnaissante.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour tout son soutien et aussi pour l'énergie avec laquelle plusieurs générations contribuent activement à la construction de notre patrimoine familial dont la plus grande richesse est sa nature culturelle et intellectuelle. Je dois à ma famille le plaisir d'apprendre et aussi celui de partager les connaissances et les expériences. Mamy, Nini, Renée, Maman, Papa, Yann, François et Geneviève, chacun votre tour et chacun à votre manière, vous m'inspirez dans ce que je pourrais être et vous me poussez à donner le meilleur de moi-même. Vos encouragements me tiennent motivée depuis toujours et ont été précieux tout au long du projet. Non seulement j'ai eu la chance d'avoir votre soutien, mais je vous remercie pour cette fierté familiale qui nous propulse tous dans nos accomplissements de la vie. Merci pour votre amour.

À tous et à toutes, je vous remercie du fond de mon cœur d'avoir contribué à cette expérience inoubliable.

Chapitre 1 Introduction

1.1 Introduction générale

En 2008, l'*International Energy Agency* (IEA) a reçu le mandat de cibler les technologies qui seraient les pierres angulaires du développement durable et d'élaborer les plans stratégiques pour leur croissance. Ces plans stratégiques serviraient de références aux décideurs chez les gouvernements et les industries pour guider leur choix dans une optique de développement durable. L'IEA a oeuvré conjointement avec le *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) sur un plan spécifique aux technologies de la production de ciment. Le plan stratégique dégagé pour l'industrie du ciment se démarque des autres plans, car il ne comporte aucune recommandation pour les chefs d'État. En effet, toute la tâche du développement durable revient au secteur industriel, d'où l'importance pour l'industrie cimentière et ses partenaires économiques d'être sensibles aux enjeux liés à la production de ciment et aux mesures de mitigations environnementales. Les prévisions mondiales annoncent une augmentation considérable de la demande au cours des prochaines décennies. Les cimenteries doivent donc être prêtes à augmenter leurs effectifs de production tout en diminuant leurs émissions. Ce double défi pour l'industrie demande de continuer les efforts déjà en place, mais surtout de persévérer en terme d'innovation pour ce matériel.

Pourquoi tant d'attention sur le ciment? Parce qu'aujourd'hui, la production de ciment est responsable de 5% à 7% des émissions de carbone émises par l'homme (Barcelo, Kline et coll. 2014). De plus, la diminution des émissions liées à la fabrication de ciment est un défi de taille, car il s'agit d'optimiser significativement un procédé déjà très performant. En effet, le ciment est loin de faire appel à un procédé de fabrication plus polluant qu'un autre. Au contraire, la fabrication d'une tonne de ciment émet beaucoup moins de carbone et consomme moins d'énergie que ne le requiert la fabrication d'une tonne d'aluminium ou d'acier! Si le matériel se démarque en terme d'émission de carbone, c'est en raison de sa popularité. Après l'eau, le béton est le matériel le plus consommé au monde; c'est donc à cause de l'ampleur de l'échelle de consommation que les émissions liées au ciment attirent

l'attention. Il est encourageant de noter que, même si le défi d'optimisation est très ambitieux, les optimisations qui semblent modestes pour une seule usine ou un seul fabricant auront un effet amplifié et significatif, lorsqu'adoptées par l'ensemble de l'industrie.

Ceux qui ont cherché à innover, dans ce domaine, ont identifié deux leviers pour faire avancer les technologies, car les émissions sont principalement générées par deux éléments du procédé : d'un côté, la décarbonatation de la calcite pour fabriquer le clinker et d'un autre côté, la consommation des combustibles pour atteindre des températures d'environ 1400°C dans le four. Les approches directes pour réduire l'impact environnemental de la fabrication du ciment sont donc : l'optimisation de l'énergie utilisée pour atteindre les températures requises à la fabrication du clinker (électricité, combustion d'hydrocarbures, etc.) et la réduction de la quantité de clinker requise dans la fabrication du béton, par l'utilisation de matériaux alternatifs à valeur ajoutée.

Heureusement, l'industrie est déjà bien avancée dans le domaine des ajouts et remplacements cimentaires. D'ailleurs, ces technologies sont bénéfiques dans la lutte pour un environnement meilleur, car elles agissent sur deux fronts. Non seulement la réduction de la quantité de clinker utilisée par mètre cube de béton mène à une diminution des gaz à effet de serre, mais la tradition de revalorisation de déchets, déjà ancrée dans le domaine des remplacements cimentaires, permet de détourner ces matériaux des sites d'enfouissement dont l'expansion est problématique! Les laitiers de haut fourneau, la fumée de silice et les cendres volantes ne sont que quelques exemples de ces matériaux autrefois coûteux à enfouir qui sont, aujourd'hui, largement utilisés dans le béton. De nos jours, les remplacements et ajouts cimentaires sont régulièrement inclus dans les mélanges de béton, car ils sont connus pour améliorer les propriétés du béton frais ou durci. La voie des remplacements cimentaires est un levier de réduction des émissions qui a déjà fait ses preuves et l'innovation dans ce domaine mérite d'être continuée.

Parallèlement aux problèmes des émissions de gaz à effet de serre, l'environnement fait aussi face au défi de la croissance des sites d'enfouissement. Selon l'estimation actuelle de la banque mondiale (Hoorweg 2012), l'humanité génère plus de 3,5 millions de tonnes de déchets par jour. Aussi, toujours selon cette source, en 2025, la production quotidienne de déchet s'élèverait au-delà de 6 millions de tonnes. Parmi les solutions à proposer pour modérer la croissance de ces sites, le verre attire l'attention, car il représente 7% de la masse de matériel enfoui (Topcu et Canbaz 2004). En Europe et en Asie, certaines instances identifient déjà des solutions afin de diminuer la quantité de verre envoyé aux rebuts. Au Québec, la tendance est à l'opposé depuis que le plus grand centre de traitement du verre a fermé ses portes (par manque de rentabilité) en 2012. Ainsi, entre 2010 et 2012, le tonnage de verre envoyé aux sites d'enfouissement a presque doublé (20 000 tonnes pour 2010 et 39 000 pour 2012 (Recyc-québec 2012)). Malgré cela, le cas du verre n'est pas sans espoir, car sa haute teneur en silice justifie l'intérêt de le broyer et l'incorporer au béton

comme remplacement cimentaire. La bonne pratique et la prudence exigent toutefois que le matériel soit soumis à des études sérieuses et rigoureuses avant d'ajouter le verre broyé à la liste des remplaçants cimentaires

Le verre broyé plus ou moins grossièrement et incorporé au béton faisait déjà l'objet d'études il y a plus d'une quarantaine d'années (Johnston 1974). Il existe trois approches pour incorporer le verre au béton; il peut être utilisé comme granulats grossier, comme granulats fin ou comme pouzzolane naturelle. Dans bien des cas, les études démontrent que le comportement rhéologique est notablement affecté lors de l'incorporation du verre au béton. Selon le cas, la maniabilité peut être affectée à la hausse ou à la baisse (Park, Lee et coll. 2004, Kara, Korjakins et coll. 2012). Cette caractéristique peut limiter la mise en marché du verre comme remplacement cimentaire, car la robustesse et le contrôle de la maniabilité des mélanges de béton frais sont des paramètres auxquels les constructeurs sont très sensibles.

Il est intéressant de faire remarquer que le béton projeté par voie sèche est un procédé de mise en place pour lequel le spectre d'acceptabilité en terme de maniabilité est très large. Il existe donc une opportunité intéressante en terme de valorisation du verre dans le contexte du béton projeté, car dans le cas d'une maniabilité faible pour les mélanges avec verre, il est probable que le mélange reste acceptable. À l'opposé, une hausse de fluidité ne serait pas sans intérêt non plus, car en béton projeté, il est également admis qu'une grande maniabilité influence positivement les paramètres tels que le rebond, l'enrobage des obstacles et même la durabilité. Conséquemment, peu importe la direction vers laquelle la rhéologie est poussée par l'incorporation du verre, les mélanges sont susceptibles de présenter un intérêt pour le marché du béton projeté par voie sèche.

1.2 Spécificité de l'étude et objectifs

Comme prémisse à cette section, il est utile de préciser que l'étude du béton projeté est une étude particulière dans le monde du béton. En effet, si la plupart des chercheurs dans le monde du béton ont le loisir de concevoir leur mélange sur papier et les préparer conformément, le chercheur en béton projeté, lui, n'a pas cette possibilité. En béton projeté, le phénomène de rebond lors de la projection induit nécessairement la perte d'une partie du matériel dont la quantité est imprévisible. Le mélange *en place* est donc différent du mélange initialement préparé et le rebond n'est pas constant d'un mélange à l'autre. La conséquence du rebond dans une étude sur le béton projeté par voie sèche est donc que les mélanges comparés ont une proportion d'ingrédients en place qui leur est propre, puisqu'ils sont le résultat de la composition initiale *et* de la projection pneumatique (ex : différents pourcentages de granulats et différents rapports E/L)

La présente étude compose avec cette particularité et insiste même sur les différences entre les bétons *en place* d'une projection à l'autre.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier la possibilité d'incorporer la poudre de verre dans le béton projeté par voie sèche. Pour cela, les travaux sont structurés en fonction des objectifs suivants :

- Étudier l'effet de poudre de verre sur le rebond et la composition en place;
- étudier l'effet de la poudre de verre sur le comportement rhéologique du béton projeté;
- suivre l'évolution de la résistance en compression dans le temps;
- étudier l'effet de poudre de verre sur le rebond;
- vérifier si les bétons projetés par voie sèche permettent d'atteindre les exigences de durabilité pour une utilisation dans un contexte de génie civil et
- vérifier si les bétons projetés par voie sèche permettent d'atteindre les exigences pour une utilisation dans un contexte de génie minier.

1.3 Présentation du document

Le mémoire s'articule autour de 6 chapitres. Le premier chapitre présente une introduction du contexte environnemental de la production de ciment, les rejets de verre vers les sites d'enfouissement. Le second chapitre présente une revue de la documentation et fournit au lecteur le bagage nécessaire pour plonger plus aisément dans les chapitres ultérieurs. Le troisième chapitre est consacré à la présentation du programme expérimental. Les chapitres 4 et 5 sont consacrés à la présentation et à l'analyse des résultats. Finalement, le chapitre 6 présente les conclusions de l'étude et propose quelques pistes pour de futurs travaux de recherche et développement.

Chapitre 2 Revue de documentation

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la revue de la documentation et vise à situer le projet par rapport aux connaissances déjà publiées sur le sujet. La revue de la documentation dévoile au lecteur les éléments qui ont permis d'orienter ce projet de maîtrise et lui donner vie. Globalement, ce projet est un effort dans la lutte contre les changements climatiques; cet aspect sera brièvement présenté dans un premier temps. Ensuite, les considérations liées à la rhéologie des bétons lors de l'utilisation du verre dans des mélanges seront explorées. Finalement, le béton projeté dans son ensemble sera présenté afin de bien illustrer cette technologie de mise en place du béton.

2.2 Du réchauffement climatique au ciment

Selon les prévisions des sources de l'*United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), en 2015, la valeur des crédits carbone émis atteindra les 100 milliards de dollars (Malone 2014). Puisque les crédits carbone font partie d'une bourse mondiale servant à moduler les émissions de gaz à effet de serre des pays, force est de reconnaître que le développement durable n'est plus un sujet nébuleux discuté par les idéalistes, mais bien une réalité qui préoccupe les économistes. Des économistes renommés se prononcent d'ailleurs en faveur de la lutte contre les changements climatiques. Les arguments sont moins de nature philanthropique, mais strictement économique : il semble plus rentable

d'investir contre la lutte que de payer la facture de l'inaction (Treasury 2006, Arrow 2007). Certains craignent le pire, alors que d'autres voient les opportunités d'action avec enthousiasme (Malone 2014). Dans tous les cas, la situation est suivie de près par beaucoup de grands acteurs économiques.

L'introduction a déjà amené l'idée qu'il semble avantageux de poser action au niveau des cimenteries, car, ensemble, elles émettent 5% à 7% des gaz à effet de serre mondiaux. En effet, pour une tonne de ciment produite, un peu moins d'une tonne de CO₂ est émise (WBCSD 2012). La Figure 2.1 présente les sources de GES mondiales et le détail des émissions liées au ciment. Un bref coup d'œil à cette figure permet de constater que deux éléments du procédé sont responsables de la majorité des émissions : la décarbonatation et la consommation de combustibles fossiles.

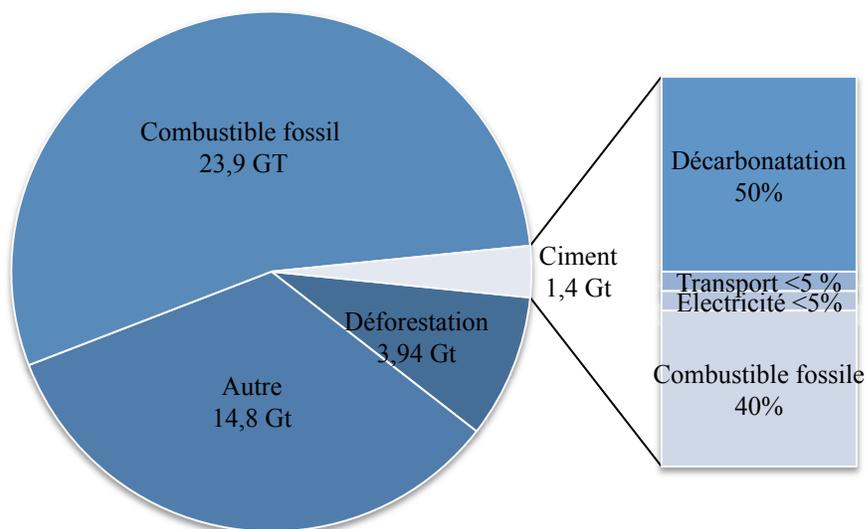


Figure 2.1 : Émissions de carbone de l'industrie cimentaire (Rehan et Nehdi 2005)

D'abord, les émissions liées à la consommation de combustible fossile sont sans surprises, car le procédé de production du ciment nécessite des températures qui sont typiquement, de l'ordre de 1400°C. Afin de diminuer les émissions de la chaîne de production tout en répondant à la forte demande énergétique, certains projets pilotes de cimenteries dont les sources d'énergie sont alternatives sont sur pied à différents endroits du globe. Autrement, pour diminuer la consommation de combustible du ciment Portland, certains repensent les proportions des phases du clinker (C₂S et C₃S) en augmentant la proportion des phases dont la production est moins énergivore pour abaisser l'énergie de production (Barcelo, Kline et coll. 2014).

En second lieu, la calcination de la calcite pour produire le clinker est l'autre partie du processus qui émet le plus de carbone. Cette décarbonatation est une étape qui consiste à arracher le carbone lié à la calcite en la chauffant. Il en résulte inévitablement un rejet de carbone, puisque c'est l'intention même de l'intervention ($CaCO_3 \xrightarrow{\text{Chaleur}} CaO + CO_2$) (Mahasenan, Smith et coll. 2003). L'oxyde de calcium (CaO) est, en effet, un ingrédient essentiel à l'assemblage de cristaux des quatre phases principales du clinker soit les C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF (leurs formules développées sont respectivement 3CaO•SiO₂, 2CaO•SiO₂, 3CaO•Al₂O₃ et 4CaO•Al₂O₃•Fe₃O₃). Puisque la décarbonatation produit environ 50% des GES, il faut repenser le ciment par rapport à son élément le plus

fondamental : le clinker. Autrement dit, une manière certaine de réduire l’empreinte écologique est l’utilisation des ajouts cimentaires, car ces matériaux peuvent permettre de créer des mélanges à béton avec un plus faible pourcentage de clinker tout en respectant les standards de qualité du béton Schneider, et coll. 2011). Par exemple, pour la construction du *Freedom Tower* à New York l’utilisation d’ajouts cimentaires a permis la conception de mélanges à béton comportant beaucoup moins de ciment, ce qui a mené à une réduction 40% des émissions liées à la production de béton pour l’ouvrage (Newswire 2013).

Dans cette optique, le plan stratégique de l’IEA prévoit des objectifs pour les mélanges de ciment en fonction des différentes régions du globe. Selon les régions du monde, la proportion visée du ratio clinker/ciment va de 0,68 à 0,81. Pour le Canada et les États-Unis, l’objectif est le suivant : le ratio doit être de 0,9 en 2015 et 0,81 en 2050 (WBCSD/IEA 2009). En Chine, par exemple, les technologies des ajouts cimentaires sont des acteurs majeurs pour l’atteinte des objectifs de réduction des GES de l’industrie cimentaire (Xu, Fleiter et coll. 2014), le ratio est donc de 0,68. En fait, le consensus sur la réduction de la teneur en clinker des ciments semble établi depuis un bon nombre d’années par bon nombre de pays. La Figure 2.2 présente bien cette tendance (il est à noter que les avancées dans ce champ sont généralement liées à la disponibilité régionale des matériaux de remplacements (Schneider, Romer et coll. 2011)).

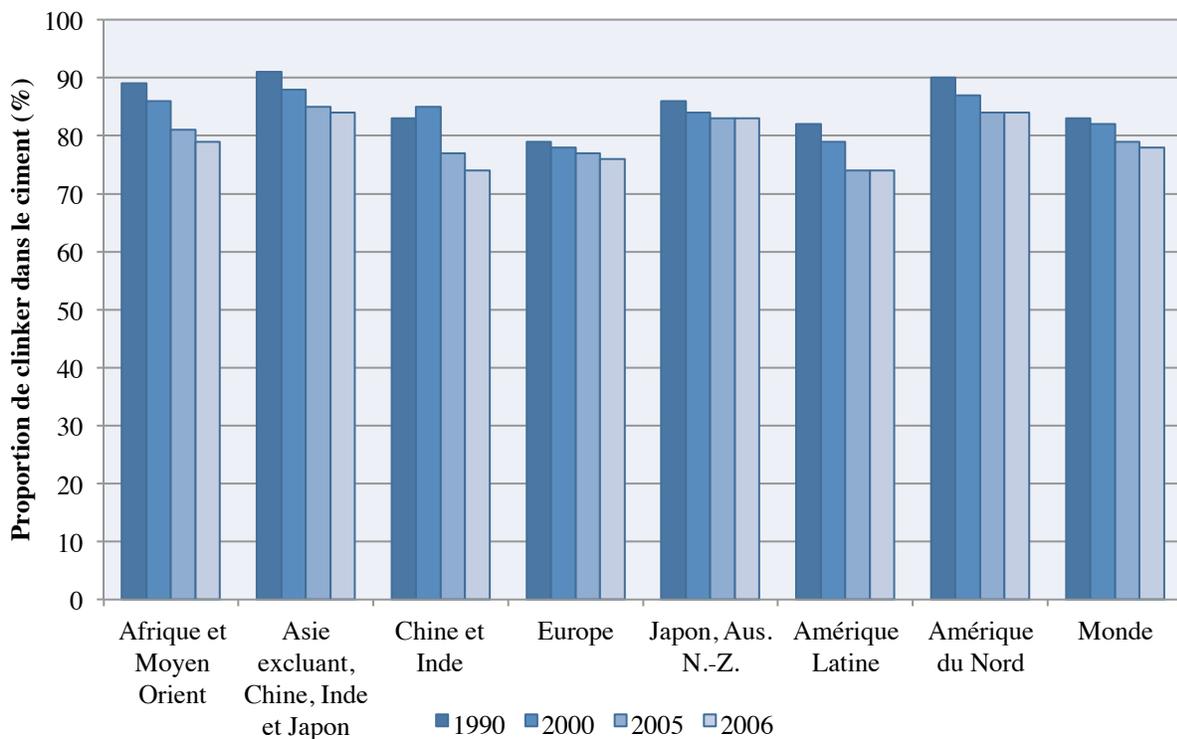


Figure 2.2 : Évolution du pourcentage de clinker dans le ciment (WBCSD-CSI 2009)

2.3 La disponibilité du verre comme remplacement cimentaire

Indépendamment des technologies existantes pour garder le matériel dans la boucle de consommation, le verre post consommé est rarement valorisé. En effet, seulement 27% du verre post-consommé est réintroduit dans la boucle de consommation aux États-Unis (EPA 2014). Il s'agit donc d'un matériau accessible et excessivement courant.

Au Québec, la fraction de matériel recyclé en 2012 par les centres de recyclages est nettement supérieure (43%), mais le verre post-consommé reste tout de même très peu valorisé. En 2012, les centres de tri ont envoyé 39 000 tonnes de verre aux sites d'enfouissement tandis qu'en 2010, seulement 20 000 tonnes y étaient destinées (Recyc-québec 2012). Cette augmentation s'explique par la fermeture du centre Klareco qui traitait la majorité du verre québécois. Depuis la fermeture du centre, le verre est entreposé ou dirigé vers les sites d'enfouissement et regrettamment, une quantité toujours croissante de verre est envoyée vers les sites d'enfouissement. Dans ces sites, le verre est traité comme un déchet ou utilisé comme matériel de recouvrement (le matériel de recouvrement peut être composé de n'importe quel matériau inerte, ce matériel sert à recouvrir le matériel enfoui à la fin de chaque journée).

D'ailleurs, un débat entoure le terme *revalorisation du verre*, lorsqu'il est utilisé comme matériel de recouvrement pour ces sites. Le terme *revalorisation* ne fait pas nécessairement l'unanimité, car la quantité de matière de recouvrement est en hausse ses dernières années (augmentation de près de 10% entre 2010 et 2012). Il est par conséquent difficile de dire si les 39 000 tonnes enfouies en 2012 ont contribué au bon fonctionnement du site ou si un tonnage moindre aurait pu être utilisé. Dans ce cas, la valorisation du verre dans les sites d'enfouissement serait alors une valorisation partielle. Dans tous les cas, le verre est un matériel indéniablement disponible sur le marché et d'autres propositions de valorisation ne pourraient être que bien vues.

2.4 Valorisation d'autres matériaux dans le béton

Jusqu'à aujourd'hui, les matériaux valorisés comme ajouts et remplacements cimentaires les plus courants sont les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes et la fumée de silice. Le laitier est un matériau souvent utilisé comme remplacement cimentaire, car il contient tous les oxydes présents dans le clinker, mais à différentes proportions et la chimie de la réaction est également de type hydraulique (réagis avec l'eau et forme des CSH sans apport externe de calcium comme les pouzzolanes). Les autres ajouts ou remplacements ont des propriétés principalement pouzzolaniques, c'est-à-dire que ce sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux qui réagissent avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment Portland. La plupart des ajouts cimentaires ont la propriété d'avoir une réaction

d'hydratation se produisant sur une plus longue durée que pour le ciment ordinaire, les gains en résistance sont plus lents et la chaleur d'hydratation plus faible. Du point de vue de l'économie, de l'environnement ou de la structure, l'utilisation de ces matériaux produits bien souvent un béton de qualité égale ou supérieure à un béton de ciment Portland ordinaire. Les propriétés de ces ajouts seront rapidement survolées dans cette section.

2.4.1 Laitier de haut fourneau

Les laitiers de haut fourneau sont coproduits lors de la production de la fonte. Ils sont produits lorsque la fonte entre en fusion après que les minerais sont mis aux fourneaux. Les oxydes viennent alors surnager au-dessus du métal en fusion et forment le laitier. Il est ensuite capté et refroidi à l'eau ou l'air sous forme de granules grossières. Un usage très courant des laitiers dans l'industrie cimentière consiste à l'utiliser comme matière première pour la fabrication de clinker, car il fournit une source de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 (Nkinamubanzi et Aïtcin 2000, Neville 2011). Les ciments de laitier dégagent moins de CO_2 , car les laitiers fournissent une source de CaO exempte de carbone (contrairement à la calcite qui doit être décarbonatée), les émissions sont alors moindres pour les ciments de laitier. Très souvent, le clinker et les laitiers sont broyés ensemble et cela forme le ciment de laitier. L'hydratation des laitiers nécessite un activateur alcalin comme le CaOH ou NaOH (Kosmatka, Kerkhoff et coll. 2003). Ces alcalins sont souvent libérés naturellement lors de l'hydratation des C_2S et C_3S . L'hydratation des ciments de laitier est plus lente que l'hydratation du ciment Portland ordinaire ce qui peut en faire un choix intéressant pour les bétons de masse. Aussi, les laitiers sont connus pour améliorer l'ouvrabilité des bétons frais. Ainsi, selon les circonstances, ce coproduit de l'industrie sidérurgique peut être intéressant d'un point de vue économique, environnemental et structural.

Dans un cadre de béton projeté, l'usage des laitiers de hauts fourneaux ne présente pas encore de caractéristiques suffisamment intéressantes pour se retrouver en chantier. Les bétons projetés avec laitiers de hauts fourneaux ont des gains de résistance en compression qui sont significativement plus lents que d'autres ajouts comme les cendres volantes ou la fumée de silice (S.B.Duffield & U 2010). D'ailleurs, dans un rapport émis en 1991, l'*international Tunneling Association* (ITA) ne recommandait pas l'usage des laitiers de hauts fourneaux en béton projeté à cause de la lenteur d'hydratation des mélanges comprenant cet ajout (Franzén 1993).

2.4.2 La fumée de silice

La fumée de silice est coproduite lors d'extraction de silicium ou d'alliage ferrosiliceux. La fumée de silice vient de l'émission de poussière lorsque le minerai est introduit dans un four à arc électrique. Cette fumée est récupérée, refroidie et ajoutée au béton comme ajout ou remplacement cimentaire. La finesse des particules permet de créer des matrices

cimentaires très denses ce qui réduit grandement la perméabilité sans toutefois modifier grandement la porosité (Neville 2011). En terme de durabilité, cette densification de la matrice cimentaire se traduit par une plus faible perméabilité aux ions chlorures et une bonne résistance aux sulfates. La fumée de silice est également reconnue pour atténuer l'expansion de la réaction-alcalis-silice et diminuer la concentration d'alcalins dans la solution poreuse. Également, la fumée de silice est connue pour avoir un effet positif sur les résistances en compression. Dans certains cas, elle peut même améliorer les résistances en jeune âge du béton (Neville 2011). Le coût généralement élevé de ce matériel ne présente pas systématiquement un avantage économique direct, par contre, l'usage de la fumée de silice peut présenter des avantages environnementaux et structuraux plus évidents.

En béton projeté, la fumée de silice est couramment utilisée, car elle réduit considérablement le rebond (jusqu'à 50% de diminution) et augmente l'épaisseur maximale de substrat lorsque la projection est verticale et orientée vers le haut (*over head*) (Morgan et Wolsiefer 1991). La fumée de silice permet des bétons projetés aux propriétés égales ou supérieures au béton projeté de ciment Portland uniquement. Malgré le coût élevé du matériau, son usage est devenu populaire au point où les propriétés d'un béton projeté avec fumée de silice sont devenues les références. C'est-à-dire que les mélanges de béton projeté avec fumée de silice servent de comparaison pour les bétons projetés qui utiliseraient des matériaux alternatifs (S.B.Duffield & U 2010). Le gain économique engendré par la diminution drastique du rebond en fait un matériau presque incontournable dans les mélanges de béton projeté.

2.4.3 Cendres volantes

Les cendres volantes peuvent être issues de plusieurs sources. Une des sources les plus courante est celle de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Selon leur composition chimique, les cendres volantes sont divisées en catégories dont les deux principales sont : la classe F contenant 15% et moins de CaO et la classe C contenant plus de 15% de CaO. Les cendres volantes de type F sont plus connues pour contrôler l'expansion de la réaction alcalis-silice tandis que les cendres de classe C contiennent quelques C₂S dont le type de réaction est hydraulique. (Neville 2011). Dans tous les cas, les cendres volantes sont connues pour améliorer l'ouvrabilité, diminuer le ressuage du béton et avoir un effet réducteur d'eau sur les bétons (Neville 2011). De plus, la finesse des particules améliore la microstructure de la matrice cimentaire et des gains en terme de résistance en compression sont généralement attendus. Toutefois, puisque la réaction est majoritairement de type pouzzolanique, les gains sont plus lents que ceux obtenus avec la réaction d'hydratation du ciment Portland ordinaire.

Le comportement des cendres volantes dans les mélanges de béton projeté est prévisible pour ceux qui connaissent son comportement dans les mélanges à béton conventionnels. Puisque les cendres augmentent l'ouvrabilité en béton conventionnel, elles augmentent la

plasticité en béton projeté en comparaison à un béton de ciment Portland uniquement, le béton projeté avec des cendres volantes présente une meilleure cohésion et un rebond plus faible (Franzén 1993). Les cendres volantes peuvent être utilisées pour réduire le rebond de 10 à 24% par rapport à un béton projeté de ciment Portland (Woolley 1996). Un autre avantage des cendres volantes est de réduire la chaleur d'hydratation (par conséquent, le retrait et la fissuration). Cette caractéristique peut être particulièrement intéressante en béton projeté, car le substrat à proximité de l'interface béton-mur et de la surface sont généralement plus riche en pâte ce qui rend ces zones plus propices au retrait ou à la fissuration. Les cendres volantes sont donc des alliés pour prévenir ce problème. Toutefois, une hydratation plus lente n'est pas nécessairement un avantage, l'inconvénient inhérent à l'usage de ce matériau est bien évidemment un gain de résistance en compression plus lent (Woolley 1996).

2.5 Rhéologie des bétons avec verre

Tels que mentionnés dans l'introduction, quelques éléments permettent de croire que le verre et le béton seraient une union intéressante d'un point de vue environnemental. Cette idée chemine depuis longtemps dans les universités, d'ailleurs, les premières recherches pour incorporer le verre au béton datent des années 1960 (Shi et Zheng 2007). L'approche initiale pour unir ces deux matériaux est, bien évidemment la moins dispendieuse en terme de coût de concassage, c'est-à-dire d'utiliser le verre comme granulats fin ou grossier. Depuis quelques années, les propositions convergent vers un usage du verre comme remplacement cimentaire. La section suivante présente quelques pistes et observations tirées d'études passées sur la maniabilité.

2.5.1 L'angularité et la densité des particules

Lorsque le granulats fin est partiellement remplacé par du verre broyé, il semble que l'ouvrabilité du béton ou du mortier diminue conjointement avec l'augmentation du taux de remplacement par le verre. Topcu et Canbaz (2004) ont vérifié l'ouvrabilité de bétons dont les granulats naturels étaient remplacés par du verre broyé de dimension 4-16 mm. Ces essais ont permis de conclure que l'affaissement diminuait parallèlement à l'augmentation de la proportion de verre. Ils proposent comme explication l'angularité des granulats de verres qui nuit à l'affaissement du béton. Paradoxalement, ils indiquent aussi que malgré la perte d'affaissement, l'ouvrabilité des bétons n'est pas affectée par le remplacement des granulats par du verre broyé, et ce, même avec une proportion aussi haute que 60%. Ismail et Al-Hashmi (2009) observent également une perte d'affaissement avec un remplacement massique de 20% du sable naturel par du verre. Tous ces auteurs remarquent une ouvrabilité satisfaisante malgré une baisse d'affaissement.

À l'opposé, Park, Lee et coll. (2004) sont d'opinion que la forme des particules affecte sévèrement l'ouvrabilité et l'affaissement. Selon leurs recherches, un remplacement de 30% à 70% des granulats fins réduirait l'affaissement de 20% à 44% (13 cm d'affaissement versus 8 cm pour un remplacement de 70%). Ils avancent que, non seulement, l'angularité des particules serait un obstacle à la fluidité, mais également qu'un remplacement massique du sable par du verre induit un plus gros volume de granulats (la densité du sable de verre est de l'ordre de 1,5) donc une plus grande surface de contact entre la pâte et les granulats. Étant donné l'augmentation de pâte nécessaire pour « envelopper » les granulats de verre, une plus faible quantité de pâte resterait pour fluidifier le mélange et permettre l'affaissement.

Les recherches de de Castro et de Brito (2012) mènent à une conclusion allant dans la même direction. Le verre grossièrement broyé (avec une surface de contact moindre) affecterait moins la fluidité que du verre finement broyé (avec une plus grande surface de contact). Ainsi, la substitution de granulats grossiers par du verre broyé ne semble pas influencer la quantité d'eau à rajouter pour obtenir une même valeur d'affaissement. Par contre, pour le remplacement de granulats fins, la demande en eau augmente. Ainsi, pour une *maniabilité égale*, le mélange contrôle possède un rapport E/C de 0,55 et le mélange avec 45% de granulats fins de verre a un rapport E/C de 0,58. Cette étude conclut que la substitution des granulats fins par le verre broyé influence significativement à la baisse l'ouvrabilité des mélanges et davantage d'eau doit être ajoutée pour des affaissements équivalents. Corinaldesi, Gnappi et coll. (2005), qui ont travaillé avec des mortiers dont le sable est partiellement substitué par du verre broyé très finement (36 à 100 μm), présentent la même conclusion. Le mortier de référence a un rapport E/C de 0,56 et, pour une ouvrabilité équivalente, le mélange avec un taux de substitution de 30% a un rapport E/C de 0,67, alors que le mélange avec un taux de substitution de 70% a un rapport E/C de 1,0.

De manière générale, l'affaissement est considéré comme un indice de la maniabilité d'un béton et l'ouvrabilité est commentée en fonction du résultat de la valeur obtenue. Il serait prudent de reconnaître que dans les études précédemment mentionnées, l'affaissement et l'ouvrabilité ne sont pas corrélés d'aussi près qu'à l'habitude par les observations des chercheurs. Puisque c'est l'application concrète de béton à des fins de construction qui est l'intérêt fondamental et que l'affaissement n'est vraisemblablement pas l'essai le plus significatif, Polley, Cramer et coll. (1998) ont mis en oeuvre un programme plus robuste pour se prononcer sur l'ouvrabilité des mélanges avec verre comme granulat fin et ont réalisé une étude avec des ouvriers dans une situation de chantier. Les ouvriers rapportent quelques particularités, comme celle de devoir ajouter davantage d'eau pour obtenir un affaissement équivalent à un béton sans verre, et celle de rajouter de l'eau sur la surface pour augmenter le volume de pâte et permettre la finition. Il semblerait donc que le verre

affecte significativement l'ouvrabilité et l'angularité des particules serait le paramètre le plus influent selon cet auteur.

Pour appuyer l'impression de tous ces auteurs, Cassar et Camilleri (2012) ont conduit une étude sur le verre imposé (c'est à dire en utilisant des particules de verre dont la géométrie est beaucoup moins angulaire). Ils concluent que, dans ce cas, l'usage du verre n'a aucune influence sur l'affaissement. À la lumière du travail effectué par un bon nombre de chercheurs, il est intéressant de constater que l'angularité des particules peut influencer de manière notable l'ouvrabilité d'un béton. Ainsi, dans le cas des mélanges de béton comprenant du verre, des études d'ouvrabilité seraient toujours recommandables en amont des travaux en chantier afin d'éviter les surprises.

2.5.2 La dimension des particules

Même si quelques études démontrent que l'angularité des particules de verre affecte à la baisse et significativement la maniabilité d'un mélange à béton, d'autres études démontrent que l'effet du verre sur la rhéologie n'est pas simple et dépend certainement de plusieurs paramètres. Plusieurs études rapportent que le béton est plus fluide lorsque le verre est utilisé comme remplacement cimentaire. Par exemple, Matos et Sousa-Coutinho (2012) ont travaillé sur des mortiers avec des remplacements cimentaires comme la fumée de silice et la poudre de verre. Dans leur essai, le mélange contrôle a un étalement de 200mm et les mélanges expérimentaux donnent les résultats suivants : le mélange avec 10% de fumée de silice a un étalement de 198 mm, celui avec 10% de poudre de verre, 204 mm et celui avec 20% de poudre de verre donne un étalement de 206 mm. Il conclut donc que le verre fluidifie les mortiers et que son influence est l'opposé de celle de la fumée de silice. De plus, l'impact sur la rhéologie est plus prononcé dans le cas du verre que dans le cas de la fumée de silice. Matos et Sousa-Coutinho observent au MEB une grande angularité des particules et indique que la finesse mesurée au laser est similaire à celle du ciment. Il semblerait donc que la fluidité des mélanges soit augmentée par le verre broyé finement.

Kara, Korjakins et coll. (2012) ont d'ailleurs exploité cette idée en comparant différentes poudres de verre en fonction de leur temps de broyage (le broyage supplémentaire suppose des particules plus fines). Ainsi, pour un béton avec un taux de remplacement cimentaire de 20% et pour des poudres de verre avec un broyage supplémentaire de 0, 30 et 90 minutes respectivement, les affaissements obtenus seraient de 100 mm, 110 mm et 130 mm respectivement. La conclusion évidente est que plus le verre est broyé longtemps (ou finement), plus la fluidité du béton est élevée.

Schwarz, DuBois et coll. (2007) poursuivent en avançant que la finesse de la poudre de verre a un effet bénéfique, mais ils constatent également, sans surprise, que le taux de remplacement joue un rôle majeur. Dans leur étude, l'ouvrabilité de la pâte augmente en fonction du taux de remplacement. Selon eux, l'absorption négligeable du verre serait en cause, car plus d'eau serait disponible pour contribuer à la fluidité et à la plasticité de la

pâte, on parlerait ainsi d'un rapport *eau disponible/ciment* plus élevé. La faible absorption l'emporterait donc sur l'angularité des particules et l'augmentation du volume de pâte en terme d'influence sur la rhéologie.

À première vue, certaines études présentées dans la section 2.5 semblent contradictoires. En revanche, une réflexion plus approfondie indique que le dénominateur commun se situe au niveau de la pâte disponible et de sa consistance. Le verre broyé finement peut rendre la pâte plus fluide en rendant disponible une plus grande quantité d'eau comparativement au ciment; l'ouvrabilité du béton serait, par conséquent, améliorée. Lorsque le verre est broyé plus grossièrement, la faible absorption est encore présente pour fluidifier, mais l'effet se manifeste faiblement, car un autre phénomène prend le contrôle de la rhéologie. En effet, lors d'un remplacement massique des granulats par du verre, le volume et la surface de granulat de verre est plus important ce qui augmente la quantité de pâte requise pour envelopper les granulats. Par conséquent, un plus gros volume de pâte est requis pour envelopper les granulats et un plus faible volume reste pour fluidifier le mélange, d'où l'effet opposé sur l'ouvrabilité. Il est à noter que les observations décrites dans cette section offrent des indices de nature empirique sur le comportement rhéologique des bétons avec verre. Dans un cadre de béton projeté avec poudre de verre, aucune observation n'a été publiée jusqu'à ce jour.

2.6 Technologie du béton projeté par voie sèche

Avant de s'avancer dans les propriétés rhéologiques d'un mélange de béton projeté, il est nécessaire d'aborder le béton projeté par voie sèche dans une perspective plus globale. Cette section est donc dédiée à la présentation des équipements et à la compréhension des principes de base concernant la mise en place du béton projeté par voie sèche.

Tout d'abord, le premier prototype de machine à projeter du béton a vu le jour pour servir le musée d'histoire naturelle de Chicago en 1907. Le « *cement* » *gun* fut pensé pour la première fois dans le but de réaliser des modèles d'animaux en béton. À cet effet, du sable et du ciment étaient placés dans une chambre pneumatique et étaient propulsés par de l'air dans un tuyau au bout duquel l'eau était ajoutée (Austin et Robins 1995). Au fil des années, l'usage du béton projeté s'est répandu et l'éventail des applications a amplement débordé les modèles d'animaux. Aujourd'hui, le béton projeté se retrouve dans la réparation des structures, les constructions d'arches minces, de dômes, de coques, de piscines et de barrages, la stabilisation de parois, la construction de tunnels souterrains et dans bien d'autres ouvrages où les coffrages seraient complexes à réaliser. Les utilisations tout comme les équipements évoluent sans cesse pour passer l'épreuve du temps et élargir le champ d'application

Le principe d'une machine à projeter par voie sèche moderne est représenté à la Figure : 2.3. Les matériaux secs sont introduits dans la machine pressurisée et l'eau est injectée à même la lance.

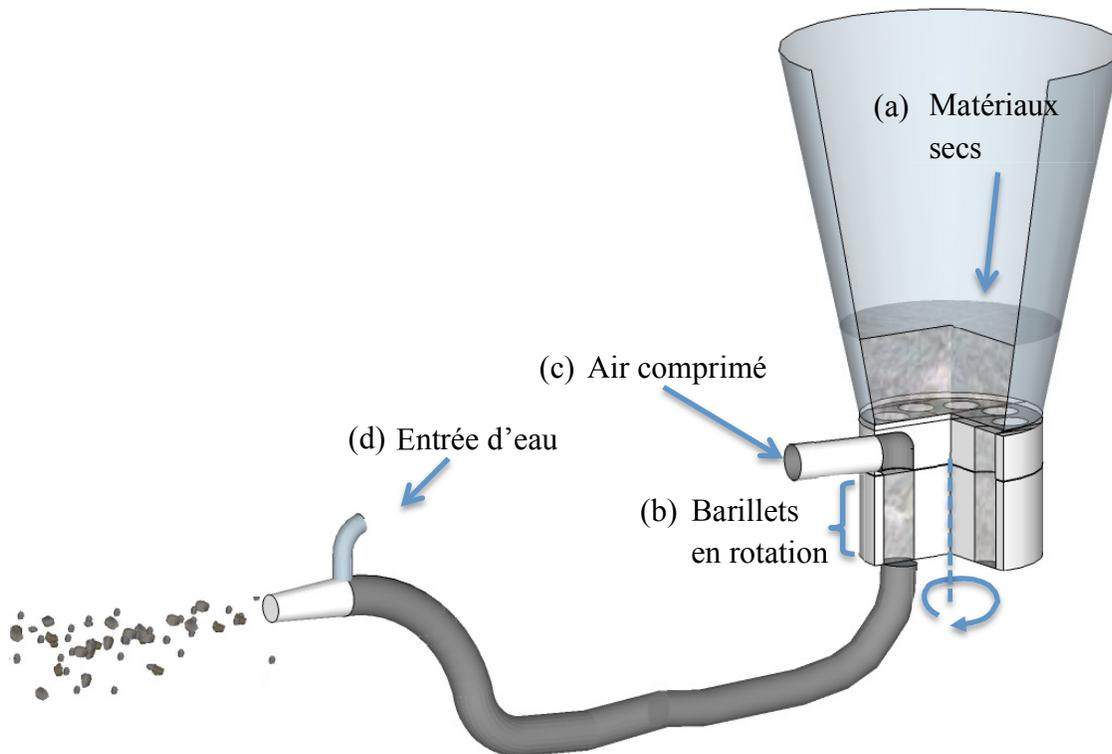


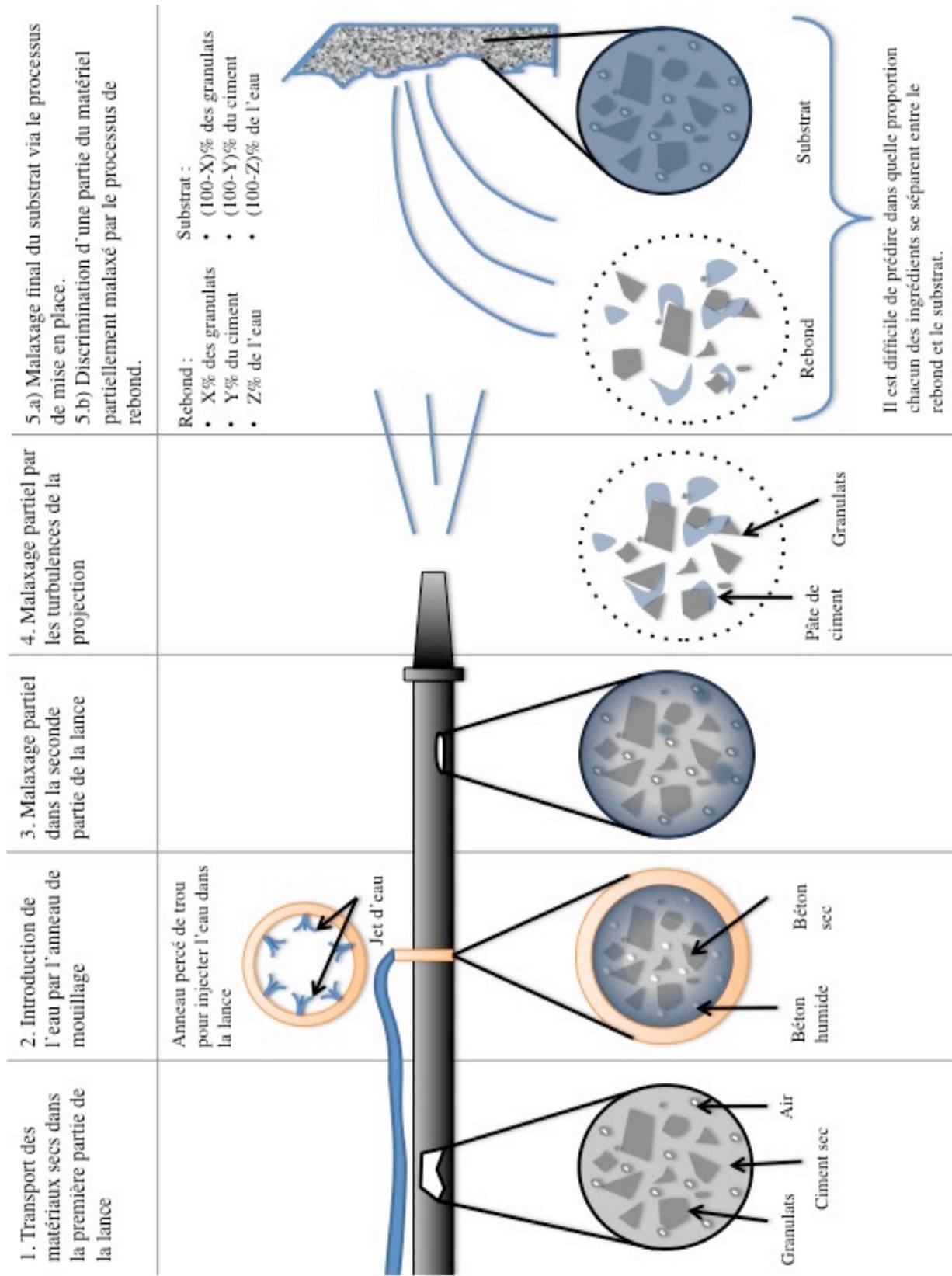
Figure : 2.3 Schéma d'une machine à projeter par voie sèche

Pour la machine, le principe général est simple (voir Figure : 2.3). Premièrement, les matériaux secs sont placés dans un cône (a), et s'écoulent par gravité dans un barillet (b). Les barillettes sont en rotation autour d'un axe central et lorsqu'un barillet rempli de matériel se trouve sous l'entrée d'air comprimé, les matériaux secs pressurisés sont propulsés dans la lance (c). Au passage à l'anneau de mouillage (d), l'eau nécessaire à la projection est introduite.

La machine à projeter apporte l'énergie nécessaire à la projection, permet le gâchage du béton et une partie du malaxage. La Figure 2.4 reprend le processus après la propulsion des matériaux secs et détaille la suite du procédé projeté jusqu'à la surface projetée.

D'abord, les matériaux secs circulent dans la lance (1), jusqu'à l'anneau d'eau (2). Après l'injection de l'eau, tous les ingrédients avancent et se mélangent dans la lance (la longueur est de 2 à 3 m pour une *lance longue* et 10 à 30 cm pour une *lance courte*). Une bonne manipulation de la lance et les turbulences de la projection assurent la première partie du malaxage (3 et 4). Ensuite, le malaxage des ingrédients est terminé à même la surface de

projection. C'est l'impact du jet de projection sur le substrat en place qui fournit l'énergie pour nécessaire à la complétion du malaxage du substrat (5.a). Finalement, une certaine quantité de matériaux rebondit au sol (5.b). Le pourcentage de rebond est fonction de plusieurs facteurs comme la consistance, l'énergie de projection et de la composition du mélange.



Il est difficile de prédire dans quelle proportion chacun des ingrédients se séparent entre le rebond et le substrat.

Figure 2.4 : Projection et rebond

2.7 Béton projeté par voie sèche et rebond

Le rebond est un sujet d'intérêt pour des raisons principalement économiques. En effet, pour des projections par voie sèche de béton, le rebond représente 30 à 40% du matériel projeté (Armelin 1997). Selon d'autres sources, le rebond serait de l'ordre de 5 à 15% pour le béton projeté par voie humide et 15 à 25 % par voie sèche (Jolin et Lacombe 2000, ACI-506 2009) même si les chiffres varient considérablement, le pourcentage de rebond reste significatif et le phénomène est largement étudié. Afin de s'y familiariser, la présente section explique les mécanismes et paramètres d'influence.

2.7.1 Mécanisme de rebond

Le modèle d'Armelin (1998), présenté à la Figure 2.5, divise le phénomène en trois temps et propose deux issues possibles lorsqu'un granulat est projeté sur du béton frais. Aux premiers instants, l'impact du contact entre le granulat projeté et le béton crée temporairement une zone élastique dans le béton frais (a). Ensuite, le granulat pénètre davantage dans le béton et la zone élastique croît au point où le béton finit par se déformer plastiquement près du granulat (b). L'étape des déformations élastique et plastique correspond à la transformation de l'énergie cinétique du granulat en énergie de déformation dans le substrat. Cette étape se poursuit donc jusqu'à ce que toute l'énergie cinétique du granulat ait été transférée au béton sous forme de déformation élastique et plastique. L'étape subséquente détermine si le granulat restera dans le substrat ou rebondira au sol. Si le granulat n'est pas suffisamment encastré dans un volume de béton il y aura expulsion. Ceci est dû à l'énergie emmagasinée sous forme de déformation élastique qui est restituée au granulat (c). Or, si au moment du retour de cette énergie élastique le granulat est bien enrobé et adhère à la zone plastifiée, l'énergie sera insuffisante pour expulser le granulat et il restera en place (d).

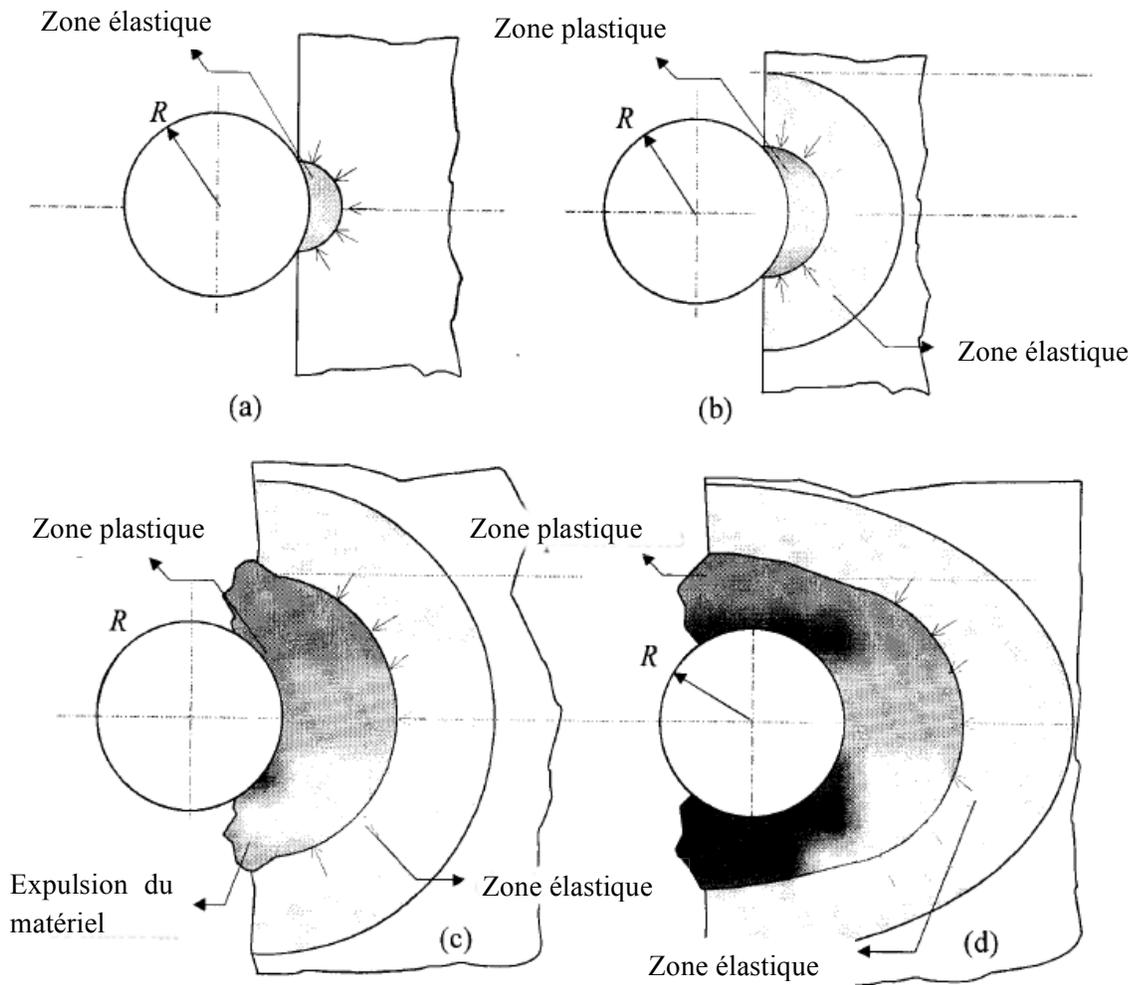


Figure 2.5 : Impact entre le granulat et le substrat (Jolin 1999)

À prime à bord, ce modèle définit le rebond comme une fonction de 2 paramètres soit : l'énergie du granulat (sa vitesse et sa masse), et le comportement élastoplastique du substrat lors de l'impact. En d'autres termes, la plasticité d'un substrat (sa capacité à se déformer plastiquement) aura un impact majeur sur le taux de rétention des granulats (et le rebond).

2.7.2 Rapport E/C

De manière générale, un rapport E/C élevé correspond à un substrat plus plastique. Les résultats de Pfeuffer et Kusterle (2001) présenté à la Figure 2.6 permettent de bien saisir ce phénomène. Aussi, la Figure 2.7 présente les résultats de Jolin (1999) pour différents débits d'eau. Encore une fois, plus la teneur en eau est élevée, plus le rebond est bas.

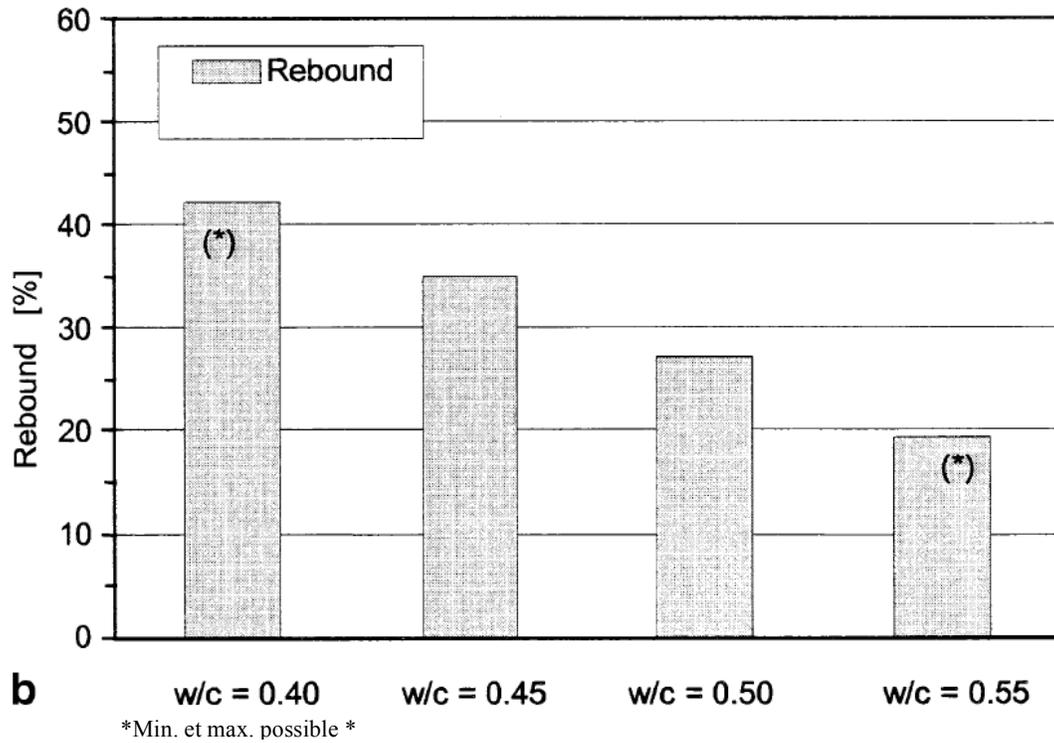


Figure 2.6 : Rebond en fonction du rapport E/C (Pfeuffer et Kusterle 2001)

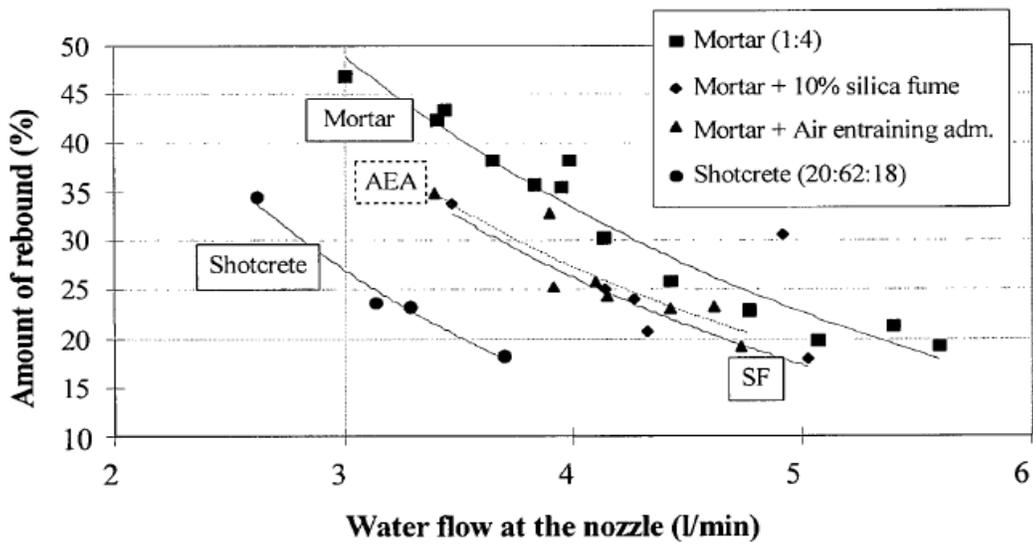


Figure 2.7 : Rebond en fonction du débit d'eau (Jolin 1999)

2.7.3 Accélérateur

Les accélérateurs ont tendance à augmenter le rebond comme le montrent les essais d'Armelin (1997). Selon lui, les accélérateurs ont tendance à rigidifier le substrat, ce qui nuit à l'encastrement des granulats projetés et provoquerait davantage de rebonds.

2.7.4 Consistance, cohésion et adhérence

Puisque le rebond est directement lié à la capacité d'un mélange à se déformer plastiquement. La mesure de la *consistance* est un paramètre jugé assez fiable pour prédire le rebond d'un mélange donné. Jolin (1999) s'est penché sur la question et en a déduit qu'une résistance à la pénétration faible corrèle fortement avec un rebond plus bas. Ces essais montrent que plus il y a d'eau, plus la consistance est faible et plus la consistance est faible, plus le rebond diminue. Les thèses d'Armelin (1997) et de Jolin (1999) présentent plusieurs résultats qui lient de très près ces deux paramètres.

Pfeuffer et Kusterle (2001) renchérissent en ajoutant que la plasticité n'est pas uniquement liée à la fluidité et à la quantité d'eau. Certes, un béton plus fluide est plus plastique et présente un rebond plus faible, mais l'adhérence et la cohésion sont deux phénomènes aussi liés à la plasticité et qui peuvent être indépendants des propriétés d'écoulement et du rapport E/C. Le lien entre une bonne cohésion et un faible rebond explique pourquoi la fumée de silice réduit le rebond même si elle réduit la fluidité. Selon cette étude, dans les mélanges avec fumée de silice, les particules en suspension et la plus grande quantité d'eau formeraient une pâte plus plastique qui favoriserait la cohésion et l'adhérence, influençant à la baisse le rebond. La fumée de silice est généralement reconnue pour diminuer le rebond, dans certains cas jusqu'à 50% (Morgan et Wolsiefer 1991).

2.8 Béton projeté par voie sèche et rebond

Dans la documentation technique sur le béton projeté par voie sèche, les recherches indiquent que plus le béton est plastique, moins le rebond sera élevé (Armelin 1997, Jolin, Beaupré et coll. 1999). Selon l'étude de Pfeuffer et Kusterle (2001), le rebond diminue avec une augmentation du rapport E/C pour un béton de ciment Portland, car cela fluidifie le béton. Ces observations sont corroborées par Gagnon, qui observe qu'une consistance plus sèche accroît le rebond (Gagnon, Jolin et coll. 2005)

Pfeuffer et Kusterle (2001) poussent la recherche un peu plus loin en employant un agent réducteur d'eau. Il compare ainsi le rebond de différents bétons qui ont la même consistance, mais différents rapports E/C et constate que la consistance à elle seule ne peut permettre de prévoir le rebond. Selon ses résultats, la quantité d'eau disponible est un autre aspect important. D'ailleurs, ils notent que les agents épaississants qui augmentent la demande en eau ont tendance à faire augmenter le rebond même si la consistance est inchangée. Aussi, Jolin, Beaupré et coll. (1999) observent que deux bétons de même

consistance peuvent avoir deux comportements différents, particulièrement lorsque les mélanges comparés comportent des ajouts cimentaires comme la fumée de silice et les cendres volantes. La notion d'eau disponible pourrait donc être liée au rebond.

Puisqu'il n'y a aucune trace dans la documentation sur les propriétés de béton projeté avec verre, leur comportement rhéologique est difficile à prévoir pour l'instant. Les observations présentées jusqu'ici fournissent cependant de nombreux indices qui permettent de supposer que le verre influencerait la quantité d'eau disponible ce qui aurait un impact significatif sur les propriétés d'un mélange à béton projeté par voie sèche.

2.9 Conclusion

À la lumière des recherches présentées dans les sections précédentes, différents éléments se dégagent pour aider à prédire l'influence de la poudre de verre en béton projeté. Dans un premier temps, il est possible que la géométrie des particules de verre rende le mélange moins fluide lors de la projection. Toutefois il est aussi possible que l'effet réducteur d'eau se fasse sentir en fluidifiant l'écoulement. L'impact que le verre aura sur l'écoulement se traduira probablement par un changement d'adhérence et de rapport E/L pour une consistance donnée, ce qui est susceptible d'avoir un effet sur le pourcentage de rebond comme le démontrent les études présentées dans la section 2.7. Aussi, il est fort possible que le verre influence la disponibilité de l'eau, ce qui serait positif sur le rebond lors d'une projection. Bref, dans un cadre de béton projeté, l'utilisation du verre pourrait avoir un impact qui serait possiblement bénéfique sur le rebond.

Chapitre 3 Programme expérimental

3.1 Introduction

La revue de littérature permet de constater la rareté des recherches jumelant le remplacement partiel du ciment par le verre et le béton projeté par voie sèche de recherche. Le présent travail saisit donc l'opportunité d'effectuer un premier travail dont le programme de recherche est axé sur le potentiel de la poudre de verre en béton projeté par voie sèche. Ce chapitre se consacre donc à la présentation du cadre expérimental de ce projet. Celui-ci a été préparé afin d'explorer les propriétés des mélanges avec verre en terme de maniabilité et aussi de vérifier quelques paramètres essentiels avant de considérer ces mélanges dans un contexte de chantier. Le programme de recherche est divisé en deux phases, une première phase exploratoire et une seconde phase consacrée à l'application des mélanges les plus prometteurs pour des usages dans le domaine de l'ingénierie.

3.2 Équipement de projection

3.2.1 Machine à projection

Le laboratoire de béton projeté de l'Université Laval est doté d'une machine de projection par voie sèche, de modèle Aliva 246 et présentée à la Figure 3.1 (aussi appelée « canon » la fiche technique de cet équipement est présentée à l'annexe A). Cette machine à moteur électrique fonctionne avec un système à barillets rotatif dont le principe est présenté à la section 2.6. Le débit d'air visé pour les essais est de 200 CFM (≈ 95 l/s) et le débit de matériau sec est maintenu constant grâce aux ouvriers qui assurent une quantité suffisante de matériau pour permettre un écoulement constant et ininterrompu. Le débit d'eau est ajusté à l'aide d'une valve fixée à même la lance et l'ouverture de cette valve est ajustée par le lancier



Figure 3.1 : Machine de projection par voie sèche de l'université Laval (Bolduc 2009)

3.2.2 Lance longue

Les essais préliminaires de projection ont été faits avec une lance longue, c'est-à-dire que l'anneau de mouillage se situe environ 2 m en aval de l'embout de la lance. Cette approche n'a pas été retenue pour la phase 1, car le substrat obtenu manquait d'homogénéité. Malheureusement, les premiers mélanges créaient des obstructions sporadiques qui provoquaient une grande variabilité dans le débit de projection. C'est pour cette raison que la lance longue a été mise de côté pour la première phase et les essais se sont déroulés à l'aide de la lance courte. Une amélioration de la granulométrie pour les mélanges de la phase 2 a permis l'utilisation de la lance longue qui est plus couramment utilisée sur les chantiers au Québec.

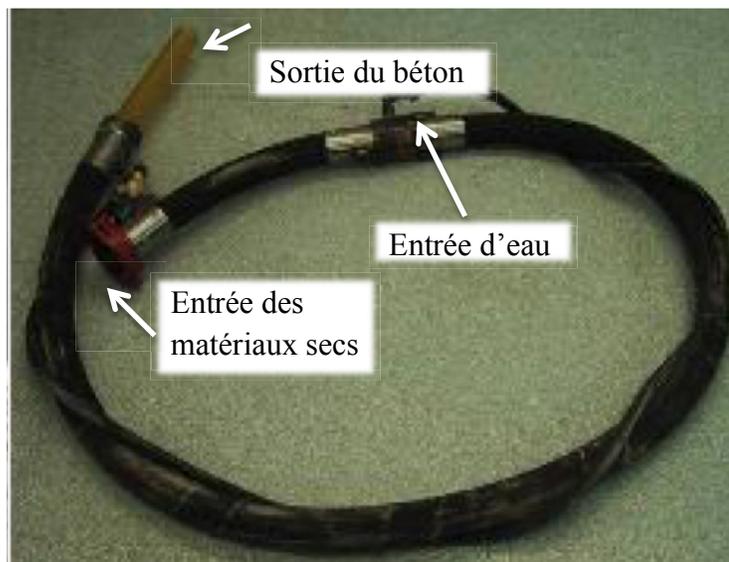


Figure 3.2 : Lance longue avec embout de type *hydromix*

3.2.3 Lance courte

La lance courte est une pièce d'équipement alternatif à la lance longue dont l'usage a permis d'éviter les problèmes de blocage et d'hétérogénéité. Avec ce type de lance, l'eau est introduite immédiatement avant la sortie de la lance (20 à 30 cm). Pour améliorer le malaxage sur cette courte distance, un embout créant davantage de turbulence est utilisé. La lance courte ainsi que l'embout utilisé sont présentés à la Figure 3.3.



Figure 3.3 : Lance courte et embout en forme de doubles bulles

3.2.4 Système d'acquisition des données des paramètres de projection

Le système d'acquisition du laboratoire de béton projeté est présenté à la Figure 3.4. Ce système permet d'enregistrer les débits d'air, d'eau et de matériel sec envoyé dans la lance ainsi que le débit de béton adhérant au moule en acier. Pour le débit de matériel sec, une balance est située sous la machine à projection. Les débits d'eau et d'air sont mesurés à l'aide de débitmètres placés près des sorties du système de pompage et du compresseur. Finalement, pour mesurer le débit de matériel accumulé lors de la projection, une cellule de charge est placée au-dessus du moule en acier et enregistre la variation de masse lors de la projection. L'appareillage décrit est relié au système dont l'acquisition est aux demi-secondes et les données sont récupérées et traitées après chaque projection. Ces informations sont précieuses pour mesurer le pourcentage de rebond et la constance des débits (pour rejeter les projections dont la constance de certains matériaux a fait défaut). La mesure de la constance des débits est particulièrement utile pour assurer la qualité des résultats obtenus. Car toutes les projections ou parties de projection qui ont présenté des débits d'air, d'eau ou de matériaux non constants ont été rejetées et reprises pour assurer la validité des résultats. C'est d'ailleurs cet aspect du contrôle de la qualité qui a permis d'exclure la lance longue lors de la phase 1 et d'y revenir dans la phase 2.



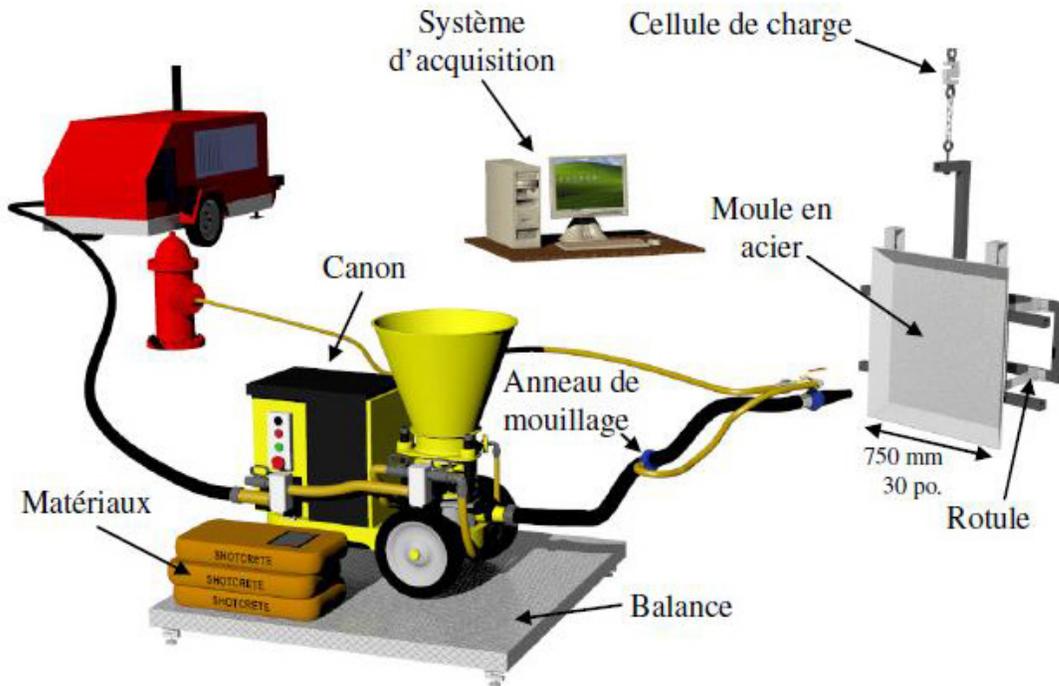


Figure 3.4 : Système d'acquisition de données du laboratoire de béton projeté

3.3 Campagne d'exploration - Phase 1

La phase 1 du projet a pour objectif d'évaluer les propriétés de mélanges à bétons avec verre dans un contexte de béton projeté. Pour borner le problème, les nouveaux mélanges sont comparés à deux mélanges plus familiers, soit un mélange à base de ciment Portland ordinaire et un mélange contenant de la fumée de silice. Étant donné les considérations évoquées dans la revue de la documentation, l'accent est mis sur la rhéologie, plus spécifiquement sur le comportement lors de la projection. C'est pour cette raison que les essais de rebond et d'étalement ont été conduits pour différents ajustements. D'autres essais de caractérisations sont jugés incontournables tels que la mesure de la résistance en compression et de l'absorption.

3.3.1 Matériaux

Les mélanges sont ensachés par Matériau King et Compagnie à leur usine située à Boisbriand : les matériaux utilisés pour la confection des mélanges ont été tous fournis par cette même compagnie à l'exception de la poudre de verre qui a été fournie par l'Université de Sherbrooke et produite par le centre Tricentris. Les caractéristiques de chacune des composantes sont présentées au Tableau 3.1. et Tableau 3.2. et les certificats d'analyses et autres fiches techniques sont présentées à l'annexe B.

Tableau 3.1 : Matériaux utilisés pour la phase expérimentale

Matériaux	Caractéristiques
Granulats	Les granulats sont un sable à béton fourni par Matériau King et Compagnie.
Ciment	Le ciment est un ciment de type GU produit par la compagnie Ciment Québec et fourni par la Matériau King et Compagnie.
Fumée de silice	La fumée de silice est fabriquée par Silicium Québec et Matériau King Compagnie.
Poudre de verre	La poudre de verre utilisée est fournie par l'Université de Sherbrooke et micronisée par le centre Tricentris.

Tableau 3.2 : Caractéristiques principales des liants utilisés

	Ciment	Fumée de silice	Poudre de verre
Dioxyde de silicium (SiO₂)	19,5	95,7	74,07
Carbone libre (C) (%)	-	2,83	-
Chlorure (Cl-) (%)	-	0,20	0,05
Oxyde d'aluminium (Al₂O₃) (%)	4,7	0,42	1,97
Oxyde de calcium (CaO) (%)	60,7	1,11	13,56
Oxyde de calcium libre (CaO) (%)	1,5	-	-
Oxyde de Fer III (Fe₂O₃) (%)	3,4	0,9	0,44
Oxyde de magnésium (MgO) (%)	2,6	0,2	1,26
Oxyde de potassium (K₂O) (%)	-	0,42	0,62
Oxyde de sodium (Na₂O) (%)	-	0,19	7,19
Oxyde de sodium équivalent (Na₂O_{eq}) (%)	0,91	0,46	7,60
Surface spécifique Blaine (m²/kg)	386	-	382

3.3.2 Mélanges

Pour cette phase, les deux mélanges de référence découlent d'un mélange de béton projeté qualifié de typique dans l'industrie minière. Le mélange avec fumée de silice sert de première borne, car il s'apparente le plus aux mélanges fréquemment rencontrés et pour comparer la poudre de verre au ciment Portland, ce même mélange sans fumée de silice sert de seconde borne de référence. Les autres mélanges sont des variantes de ce même mélange, de sorte que tous les mélanges préensachés ont les mêmes proportions de granulats et de liant. La nature du liant est le seul paramètre qui varie dans la composition d'un mélange à l'autre.

Dans la phase exploratoire, quatre mélanges ont été confectionnés : deux mélanges de référence et deux mélanges expérimentaux. Le premier mélange de référence appelé mélange contrôle (Ctrl) est produit avec un liant de ciment Portland uniquement. Le second mélange de référence appelée FS10 est fait avec un liant dont 10% de la masse du ciment est remplacé par de la fumée de silice. Ce mélange avec fumée de silice est utilisé comme second mélange de référence, car la fumée de silice est connue pour bonifier les propriétés du béton frais et durci. Le mélange PV20 est un mélange dont 20% du ciment est remplacé par de la poudre de verre. Le taux de remplacement a été choisi à 20 %, car c'est une fraction de remplacement assez importante pour s'attendre à un comportement significativement différent des mélanges de référence. Le mélange PV10FS10 est un mélange dont une fraction de 20% est remplacée par de la poudre de verre et 10% par de la fumée de silice. Ce mélange sert à vérifier la présence d'une synergie entre la poudre de verre et de la fumée de silice. Le Tableau 3.3 présente le pourcentage d'ajouts cimentaires en remplacement ainsi que la nomenclature associée aux mélanges. Le Tableau 3.4 présente la composition des mélanges en pourcentage massique.

Tableau 3.3 : Composition en pourcentage massique du liant pour les différents mélanges

Mélanges	Ciment type GU	Fumée de silice	Poudre de verre
Ctrl	100%	-	-
FS10	90%	10%	-
PV20	80%	-	20%
PV10FS10	80%	10%	10%

Tableau 3.4 : Composition en pourcentage massique des mélanges secs de la phase 1

Mélange	Ciment type GU (%)	Fumée de silice (%)	Poudre de verre (%)	Sable à béton (%)
Ctrl	19,66%	-	-	80,34%
FS10	17,69%	1,97%	-	80,34%
PV20	15,73%	-	3,93%	80,34%
PV10FS10	15,73%	1,97%	1,97%	80,34%

La composition des mélanges est présentée en pourcentage massique, car le rapport E/C est inconnu avant la projection. À titre indicatif, le Tableau 3.5 présente la composition *équivalente* de ces mélanges par mètre cube pour un rapport E/L de 0,40 et 3% d'air occlus.

Tableau 3.5 : Composition par mètre cube pour un rapport E/L théorique de 0,40

	Liant (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Poudre de verre (kg/m ³)	Fumée de silice (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Granulats (kg/m ³)
Ctrl	428	428	-	-	171	1750
FS10	426	383	-	43	170	1739
PV20	415	332	83	-	166	1697
PV10FS10	419	335	42	42	168	1713

La densité correspondante aux matériaux utilisés ainsi que celle des mélanges de liants est présentée au Tableau 3.6. Ces informations serviront à l'analyse de la section 5.2.1.

Tableau 3.6 : Densité des différents liants

Liant	Densité
Ciment	≈ 3,15
Fumée de silice	2,24
Poudre de verre	2,54
FS10	3,06
PV10FS10	3,00
PV20	3,03
PV20FS10	2,94

3.3.3 Essais

La phase 1 est constituée de deux groupes d'essais, soit les essais sur béton frais et les essais sur béton durci. Le premier groupe d'essai est réalisé immédiatement après chaque projection et comprend; la détermination de la composition en place; la mesure de la consistance au pénétromètre; l'évaluation de la masse du rebond et la mesure de l'étalement latéral. Le second groupe d'essai les essais de résistance en compression (réalisés à 7, 28 et 90 jours) et les mesures d'absorption (réalisés à 28 jours).

3.3.3.1 Composition en place

L'essai de détermination de la composition en place est effectué immédiatement après la projection. Cet essai renseigne sur la teneur en eau, la teneur en liant et la teneur en granulats.

Pour obtenir le teneur en eau, il suffit de collecter environ 1 kg de béton frais et de mesurer la masse de l'échantillon de béton frais avant et après l'avoir chauffé au micro-ondes à différents intervalles de temps, jusqu'à ce que la masse se stabilise et que toute l'eau présente dans l'échantillon de départ se soit évaporée. Le pourcentage d'eau est calculé selon l'équation 3.1.

$$\% \text{ Eau} = \frac{M_{\text{Béton frais}}(kg) - M_{\text{Béton sec}}(kg)}{M_{\text{Béton frais}}(kg)} \quad \text{éq. 3.1}$$

Pour obtenir la composition en place, un second échantillon d'environ 1 kg de béton frais est retiré du panneau de projection et pesé dans un bol. Suite à cela, l'échantillon est lessivé au tamis et à l'eau courante jusqu'à ce que les particules fines (moins de 80 µm) soient complètement évacuées. La Figure 3.5 présente la procédure répétée jusqu'à ce que l'eau soit parfaitement limpide. Finalement, le bol ne contenant plus que l'eau et les granulats est séché à l'étuve et pesé. Le pourcentage de granulats est déterminé selon l'équation 3.2

$$\% \text{ Granulats} = \frac{M_{\text{Granulats secs}}(kg)}{M_{\text{Béton frais}}(kg)} \quad \text{éq. 3.2}$$



Figure 3.5 : Lavage des granulats (Bolduc 2009)

La teneur en liant peut ensuite être calculée en posant l'hypothèse que le ciment, la poudre de verre et la fumée de silices sont de dimensions inférieures à 80 µm et que tout est lessivé lors du lavage du béton au tamis 80 µm. La teneur en liant est déduite en soustrayant le pourcentage total du pourcentage d'eau, de granulat et de particules fines (> 80 µm déterminées en tamisant un échantillon de granulats) apportées par les granulats. L'équation 3.3 présente l'opération.

$$\% \text{ Liant} = 1 - \% \text{ Eau} - \% \text{ Granulats} - \% \text{ Fines apportées par les granulats} \quad \text{éq. 3.3}$$

Finalement, pour déterminer la proportion de chacun des éléments par mètre cube. Le pourcentage massique des trois composants est multiplié par la masse volumique du béton frais. Les calculs sont présentés aux équations 3.4 à 3.6.

$$\frac{\text{Masse}_{\text{Eau}}}{\text{m}^3 \text{ Béton}} = \rho_{\text{Béton frais}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \% \text{ Eau} \quad \text{éq 3.4}$$

$$\frac{\text{Masse}_{\text{Liant}}}{\text{m}^3 \text{ Béton}} = \rho_{\text{Béton frais}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \% \text{ Liant} \quad \text{éq 3.5}$$

$$\frac{\text{Masse}_{\text{Granulat}}}{\text{m}^3 \text{ Béton}} = \rho_{\text{Béton frais}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \% \text{ Granulat} \quad \text{éq 3.6}$$

La masse volumique est calculée en utilisant la densité brute des échantillons mesurée lors de l'essai d'absorption (voir section 3.3.3.6). En effet, la masse volumique SSS offre une bonne approximation de la masse volumique du béton frais (Kosmatka, Kerkhoff et coll. 2003).

3.3.3.2 Pénétromètre

L'essai au pénétromètre donne un indice sur consistence d'un béton à l'état frais. Cet indice correspond à la contrainte (MPa) qui doit être appliquée à la surface du béton pour que l'aiguille du pénétromètre s'enfonce à vitesse constante dans le béton frais. Plusieurs auteurs ont remarqué un seuil de valeur pour la contrainte de résistance à la pénétration et cette valeur est utilisée comme propriété pour caractériser un béton frais (Armelin 1997, Jolin 1999). L'essai se réalise simplement en enfonçant l'aiguille du pénétromètre à un rythme constant (5 entre 10 secondes pour une profondeur d'environ 25 mm).

L'appareil de l'université Laval, illustré à la Figure 3.6, est composé d'une cellule de charge, de deux LVDT et de plaques de métal de 50 mm de diamètre fixées aux extrémités du LVDT afin que les extrémités des capteurs ne s'enfoncent pas dans le béton. Les données recueillies par la cellule de charge sont en Newton et pour convertir la force en pression, il suffit de diviser la force par la surface de l'extrémité de l'aiguille plate de 9mm de diamètre. La profondeur de pénétration est calculée en faisant la moyenne des déplacements enregistrés par les deux LVDT.

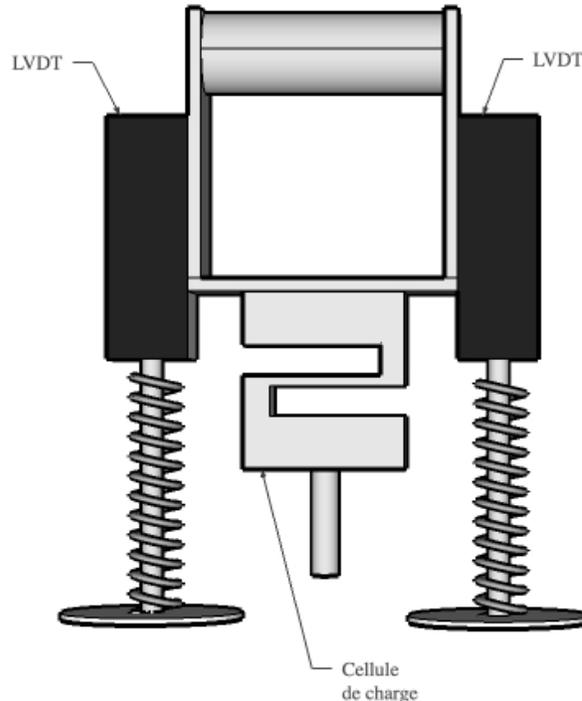


Figure 3.6 : Pénétromètre de l'université Laval

La prise de mesure est répétée plusieurs fois et permet de construire le graphique de la contrainte de pénétration en fonction de la profondeur. Un exemple de graphique typiquement obtenu est présenté à la Figure 3.7. Les données résumées sur graphique sont utiles pour déterminer une seule valeur (seuil de résistance à la pénétration). Pour sortir un seuil unique du graphique, il faut soustraire l'influence de la friction à la pénétration. Par exemple, à la Figure 3.7, la droite en mauve représente la pente moyenne de résistance à la pénétration jusqu'à l'atteinte du seuil de pénétration qui est, ici, légèrement supérieur à 1MPa. Dans cet exemple, cela signifie que, pour enfoncer l'aiguille du pénétromètre dans le béton à une vitesse constante, il faut graduellement augmenter la pression de pénétration jusqu'à 1 MPa. À partir de cette valeur, le béton résiste très peu à la pénétration de l'aiguille sinon par friction (d'où le changement de pente pour obtenir la droite en rouge de la Figure 3.7). Par conséquent, le seuil correspondant à la résistance à la pénétration du béton se trouve à la jonction des deux droites. Étant donné la variabilité observée d'une

mesure à l'autre, la valeur obtenue avec l'essai de pénétromètre est davantage utilisée comme indice pour comparer les mélanges les uns par rapport aux autres et non pour en déterminer une propriété absolue. Un aspect particulièrement intéressant de l'essai au pénétromètre réside dans le fait que les résultats obtenus permettent de quantifier un paramètre autrement exprimé qualitativement en fonction de l'appréciation du lancier (les ajustements qualitatifs secs, idéaux ou humides sont maintenant quantifiés en MPa).

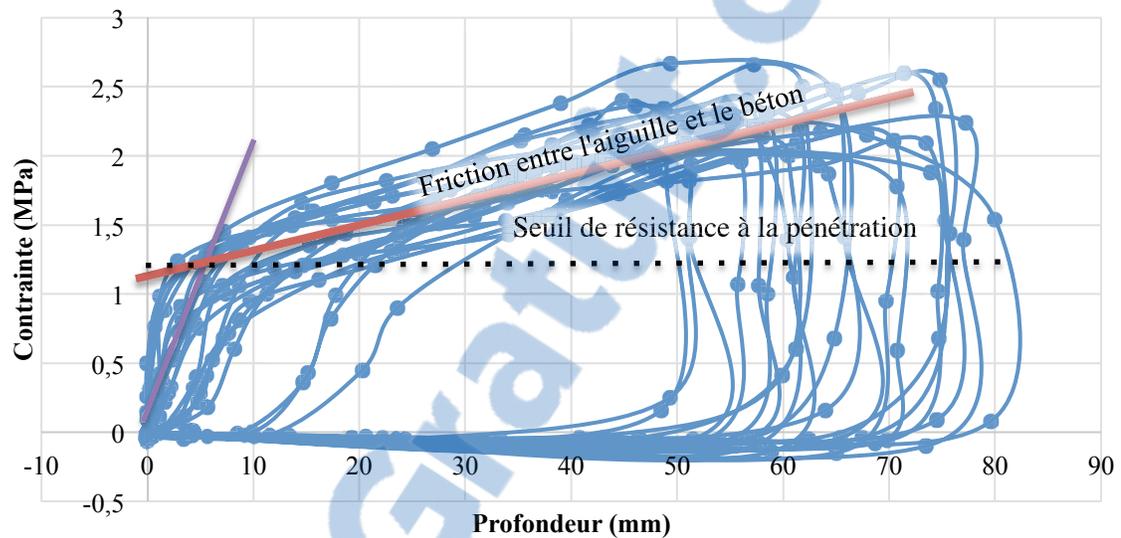


Figure 3.7 : Résultat typique de pénétromètre et interprétation du graphique

3.3.3.3 Rebond

Le montage utilisé pour mesurer le rebond est constitué d'un moule fixé au mur par le biais de rotules. Les rotules permettent le mouvement du moule dans l'axe vertical et la sollicitation de la cellule de charge, c'est ainsi que la masse de matériel restant dans le moule est déterminée. Le moule est présenté à la Figure 3.4.

Pour l'essai de rebond, il est nécessaire de faire adhérer au moins 50 kg de matériel sur le moule de rebond en enregistrant les débits des constituants (eau, matériel sec et matériel adhérent). Le pourcentage de rebond se calcule ensuite selon l'équation 3.7. La Figure 3.8 présente les courbes typiques avec lesquels les valeurs de rebond sont calculées.

$$\% \text{ Rebond} = \frac{\text{Matériel projeté} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) - \text{Matériel adhérent} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Matériel projeté} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)} \quad \text{éq. 3.7}$$

où

$$\text{Matériel projeté} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = \text{Eau} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) + \text{Matériel sec} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

et

$$\text{Matériel sec} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = -\text{Masse de la balance} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

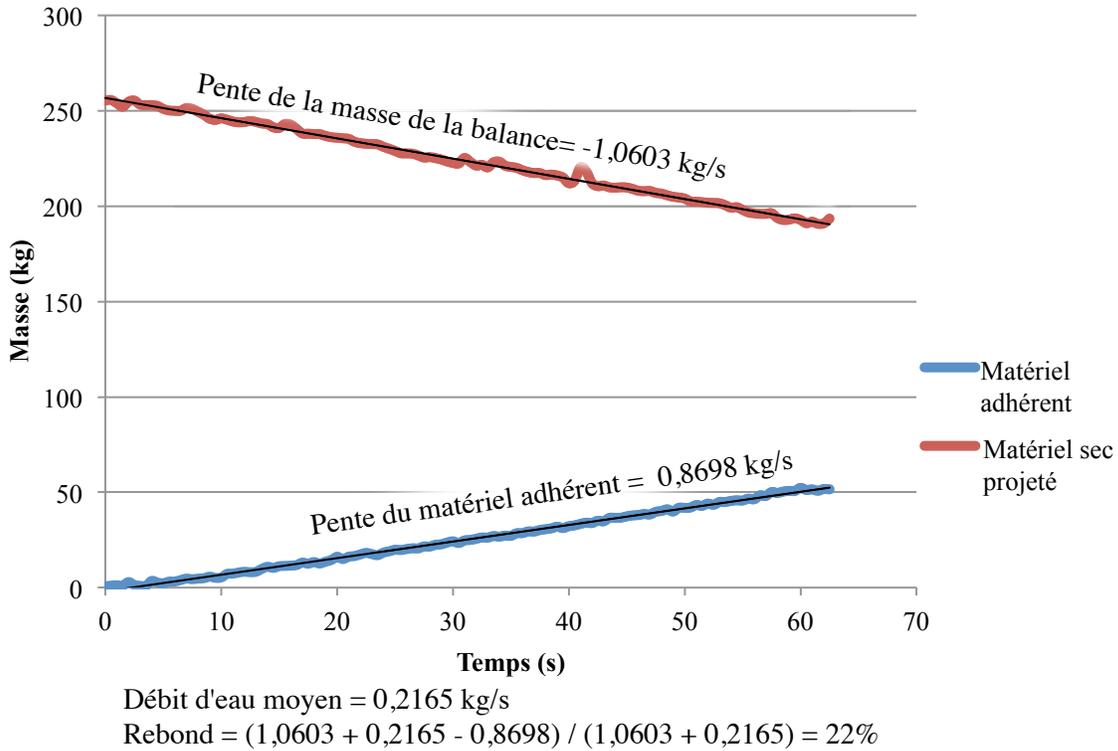


Figure 3.8 : Résultat typique servant au calcul de la valeur de rebond

3.3.3.4 Étalement latéral

Inspiré par les travaux de Jolin (1999), cet essai vise à donner un indice sur le potentiel d'un mélange à enrober des obstacles lors de la projection (par exemple, les barres d'armature). Cet essai sert à mesurer la capacité d'un béton projeté à se déplacer perpendiculairement à l'axe de projection. En d'autres mots, cet essai sert à quantifier le potentiel d'un béton projeté à se mettre en place derrière les obstacles.

Le montage de mesure de l'étalement latéral ressemble à une boîte peu profonde, ouverte sur les côtés et avec des volets sur les extrémités latérales. La Figure 3.9 présente un schéma de l'essai lors d'une projection et les dimensions du panneau utilisé.

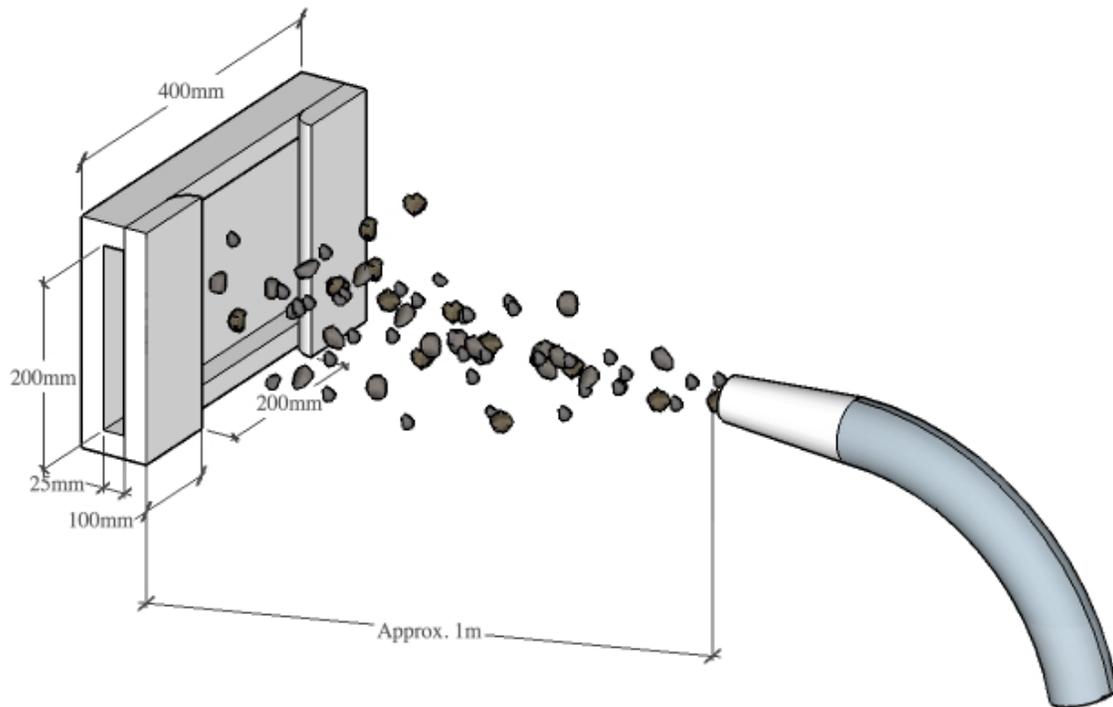


Figure 3.9 : Panneau de mesure d'étalement latéral avant et pendant une projection

La Figure 3.9 présente bien que les volets isolent du jet de projection les deux extrémités latérales du panneau. Ainsi, le béton accumulé derrière les volets est poussé par l'énergie de mise en place uniquement.

La Figure 3.10 illustre le montage après l'essai d'étalement latéral et l'arrière des volets. La zone derrière ceux-ci correspond à la surface considérée pour la prise de mesure de l'étalement latéral (aux limites inférieures et supérieures du panneau, quelques centimètres sont rejetés pour la prise de mesure, car le confinement du jet aux coins du montage crée des turbulences qui sont normalement absentes en contexte de chantier). Les résultats recueillis par le biais d'une photo de l'intérieur du moule dont les images sont traitées avec le logiciel *ImageJ*. Les mesures réalisées sont présentées à la Figure 3.11 et l'équation 3.8 est utilisée pour mesurer la largeur de l'étalement latéral.

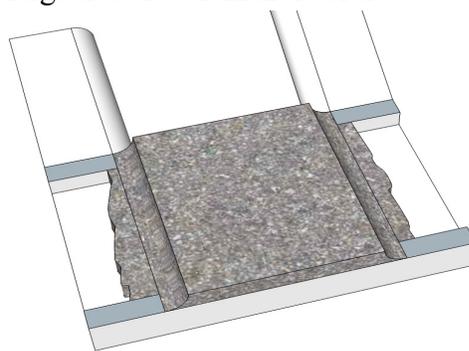


Figure 3.10 : Schéma typique du montage d'étalement latéral après projection

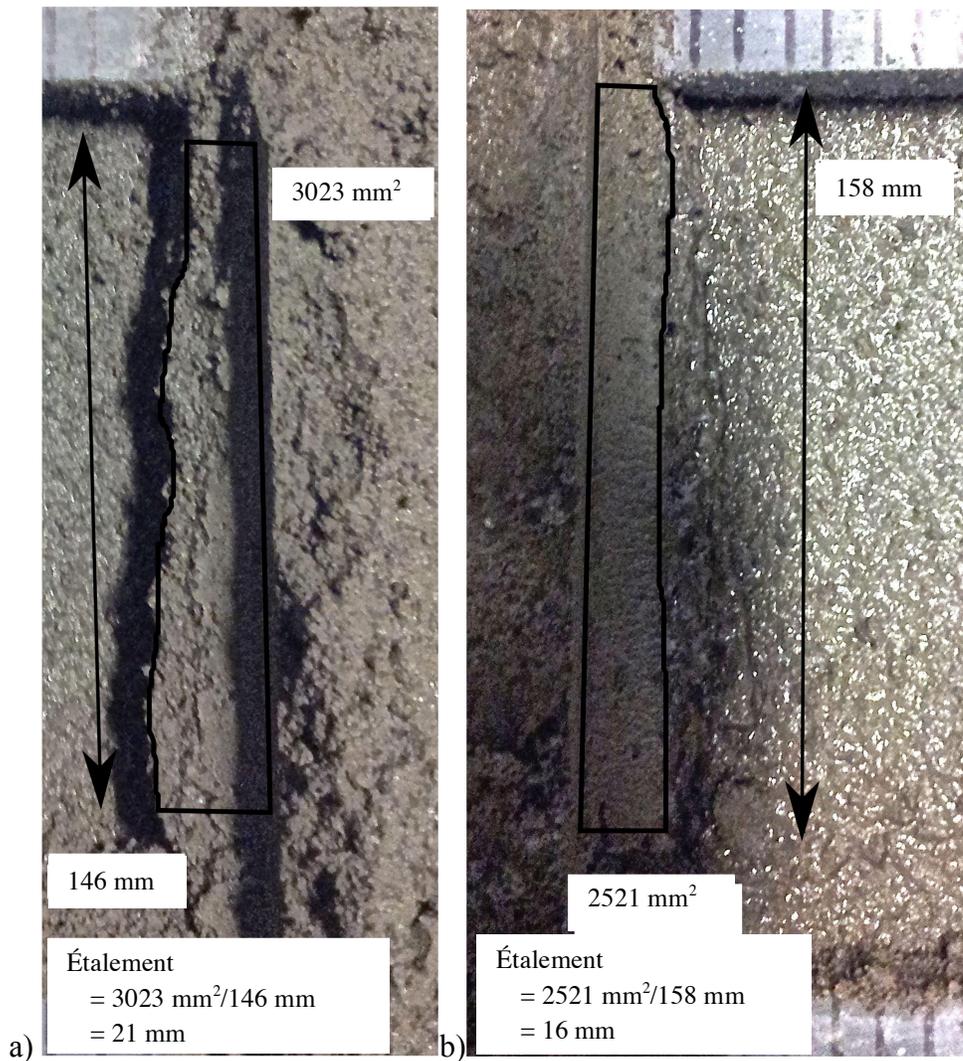


Figure 3.11 : Montage d'étalement latéral après projection et traitement d'image

$$\text{Étalement latéral (mm)} = \frac{\text{Surface étalée derrière les volets (mm}^2\text{)}}{\text{Hauteur de la zone représentative étalée (mm)}} \quad \text{éq.3.8}$$

3.3.3.5 Résistance à la compression

La confection d'éprouvette en béton projeté ne fait pas appel à des moules cylindriques comme en béton conventionnel. Le béton est d'abord projeté dans un panneau de bois (Figure 3.11 a)). Une fois le béton durci, les cylindres sont extraits par carottage et ensuite surfacés (Figure 3.12.b) et c)). Les essais de compression sont exécutés en conformité avec la norme ASTM C1604 selon les échéances.

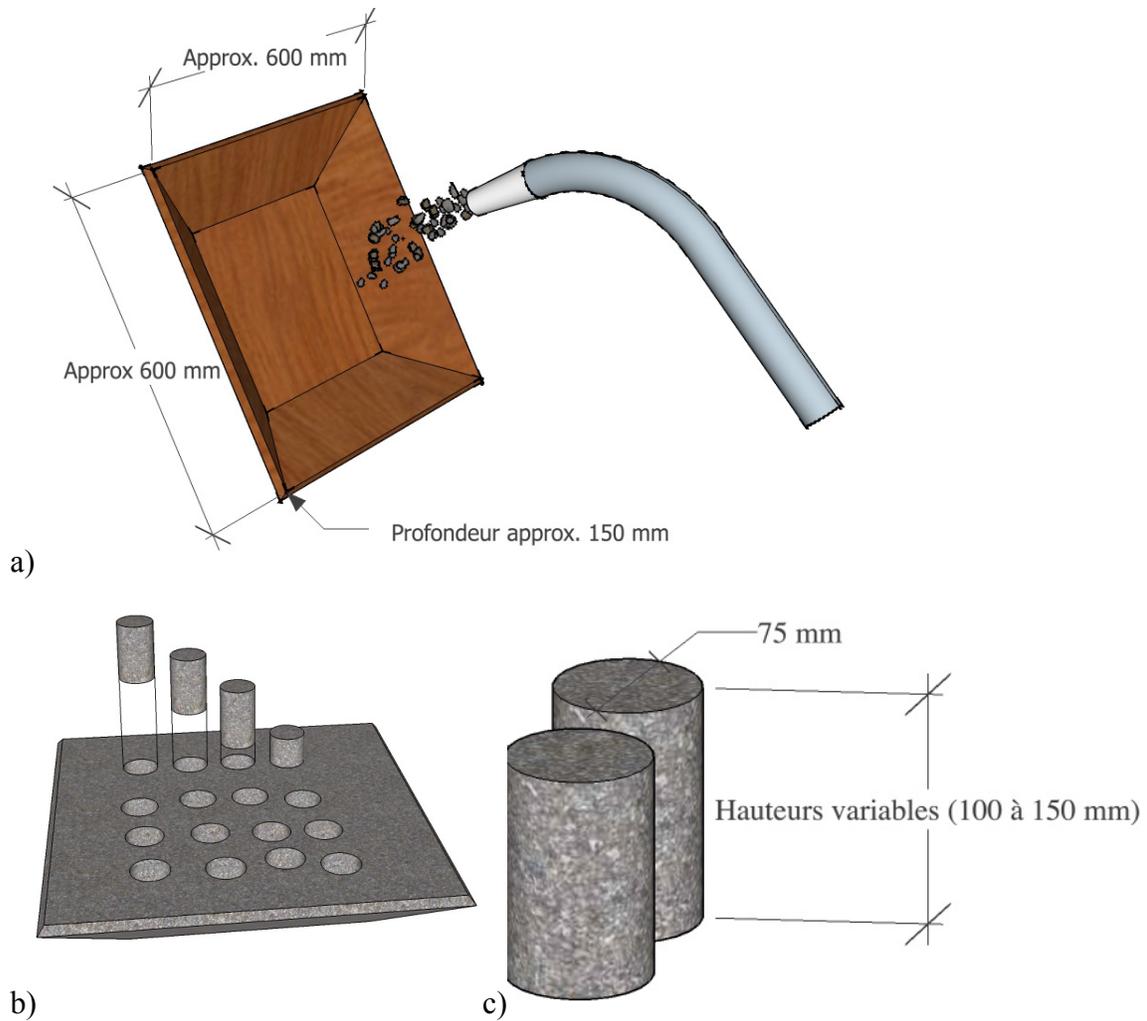


Figure 3.12 : a) Panneau lors d'une projection, b) Carottage de cylindres, et c) Cylindres surfacés

3.3.3.6 Absorption, volume des pores perméables et masse volumique

Les essais d'absorption sont réalisés en conformité avec la norme ASTM C672. Les valeurs obtenues sont par la suite interprétées en fonction des critères de qualité établis par l'étude de Morgan (1987). Le Tableau 3.7 présente les niveaux de qualité et les critères associés.

Tableau 3.7 : Critères de qualité de Morgan

Qualité	Absorption (%)	Volume de pores perméables (%)
Excellent	< 6	< 14
Bon	6 - 8	14 - 17
Acceptable	8 - 9	17 - 19
Marginal	> 9	> 19

La masse volumique du béton frais est déterminée en utilisant les valeurs intermédiaires de l'essai ASTM C642 au moyen de l'équation suivante

$$Masse\ volumique_{Béton\ frais} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = Masse\ Volumique_{SSS} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_{SSS} (kg) * M.V.Eau \left(\frac{kg}{m^3} \right)}{M_{SSS} (kg) - M_{immergée} (kg)} \quad \text{éq 3.9}$$

3.3.4 Ajustement des mélanges lors de la projection

Dans cette étude, les mélanges ont été projetés pour des ajustements dits « secs », « idéaux » ou « humides ». Le lancier contrôle l'ajustement de l'eau en fonction de l'appréciation visuelle du béton en place. Il est important de mentionner que le débit d'eau est le seul paramètre directement contrôlé par le lancier. Les autres paramètres de composition en place comme les quantités de liant et de granulats sont indirectement influencés par le débit d'eau (voir section 2.7), mais pas directement par le lancier. L'ajustement visuel est quelque peu subjectif, mais le choix de cette méthodologie prend tout son sens lorsqu'on considère la pratique, car le lancier perçoit généralement les différences des comportements rhéologiques des mélanges. Dans la pratique, certains mélanges sont parfois qualifiés de « faciles » ou « difficiles » à ajuster. En fonction de l'expérience et l'habileté du lancier, des ajustements idéaux, trop secs ou trop humides sont possibles. Voici les critères de référence pour les ajustements de ce projet de maîtrise :

- L'ajustement « idéal » est atteint lorsque le mélange en place est assez fluide pour permettre l'encastrement des granulats, mais assez rigide pour que le granulat ne s'enfonce qu'à moitié. La surface de béton frais est également d'apparence légèrement lustrée. Ce critère d'ajustement produit des bétons près de ce qui est produit en chantier. Ces critères d'ajustement ont été étudiés pour les mélanges des phases 1 et 2.
- L'ajustement « humide » correspond au débit d'eau maximal pouvant être atteint lors de la projection sans que le mélange perde sa stabilité au mur (s'écoule). Les projections faites à cet ajustement correspondent normalement à l'extrême limite de ce qui est susceptible de survenir en chantier. Dans ce cas, la surface finale est d'apparence très lustrée. Ces ajustements ont été utilisés à la phase 1 uniquement.
- L'ajustement dit trop sec correspond au débit minimal d'eau pour qu'il y ait accumulation de matériel au mur. La surface est d'apparence sèche et sans aucun lustre. Cet ajustement explore encore une fois les conséquences de manœuvres n'ayant pas respecté les règles de bonne pratique et représente l'autre extrême de ce qui est susceptible de se produire en chantier. Cet ajustement a été étudié à la phase 1 uniquement.

Il est bon de rappeler que ces trois ajustements correspondent à un large éventail de possibilités en terme de *composition en place* pour un même mélange de départ. La particularité de l'étude du béton projeté réside dans le fait que les résultats permettent davantage de se prononcer sur les performances d'un mélange dans le contexte d'une projection et non sur l'efficacité absolue des composants les uns par rapport aux autres.

3.3.4.1 Récapitulatif de la stratégie expérimentale de la première phase

Puisque le verre comme ajout cimentaire n'a pas encore été documenté dans la littérature, la phase 1 vise à dresser les grandes lignes du comportement du verre dans un contexte de béton projeté. Le Tableau 3.8 présente les caractéristiques principales qui sont explorées dans le but de mieux connaître le comportement du verre en béton projeté pour ensuite orienter la phase 2. Avec une meilleure connaissance du comportement générale grâce à la phase 1 il sera possible de mieux renseigner l'industrie sur les avantages et désavantages de l'usage du verre en béton projeté grâce aux essais la phase 2.

Tableau 3.8 : Synthèse de la démarche expérimentale de la phase 1

Hypothèse	Essai	Mélanges
Pour un même ajustement, la poudre de verre a un impact sur les proportions d'eau de granulats et de liant en place	Composition en place	<ul style="list-style-type: none"> • Ctrl • FS10 • PV20 • PV10FS10
La réponse du changement d'ajustement des mélanges avec poudre de verre est différente de la réponse des mélanges Ctrl ou FS10	Composition en place	<ul style="list-style-type: none"> • Ctrl (3 ajustements*) • FS10 (3 ajustements*) • PV20 (3 ajustements*) • PV10FS10 (3 ajustements*)
Les résistances en compression sont liées à la composition en place et à la qualité des hydrates formés par les différents liants	Résistance en compression (7, 28 et 90 jours)	<ul style="list-style-type: none"> • Ctrl (3 ajustements*) • FS10 (3 ajustements*) • PV20 (3 ajustements*) • PV10FS10 (3 ajustements*)
La poudre de verre a un impact sur le rebond et cet impact est lié à l'ajustement	Rebond	<ul style="list-style-type: none"> • Ctrl (3 ajustements*) • FS10 (3 ajustements*) • PV20 (3 ajustements*) • PV10FS10 (3 ajustements*)
La poudre de verre a un impact sur la qualité de la mise en place du substrat et cet impact est lié à l'ajustement	Étalement latéral	<ul style="list-style-type: none"> • Ctrl (3 ajustements*) • FS10 (3 ajustements*) • PV20 (3 ajustements*) • PV10FS10 (3 ajustements*)
La poudre de verre a un impact sur l'absorption, le volume de pores perméable et la masse volumique du béton	Absorption, volume de pores perméable et masse volumique	<ul style="list-style-type: none"> • Ctrl (3 ajustements*) • FS10 (3 ajustements*) • PV20 (3 ajustements*) • PV10FS10 (3 ajustements*)

* Les ajustements sont les suivants : sec, idéal et humide

3.3.5 Observations préliminaires

La phase 1 a permis de constater le comportement rhéologique particulier des mélanges avec poudre de verre. Les observations du lancier indiquent que le mélange se fluidifie lors de la projection et qu'aussitôt en place, il se rigidifie. C'est pourquoi le comportement du mélange PV20 est jugé peu intéressant, car sa consistance trop fluide et trop dure à la fois rend l'ajustement difficile et apporte des défauts importants au béton frais et durci. En effet, ces bétons présentent une grande quantité de vides de compaction et un rebond important. À l'inverse, le mélange ternaire n'est ni trop fluide ni trop ferme, ce qui procure au mélange la meilleure combinaison pour qu'il ait de faibles valeurs de rebond et une bonne mise en place. Ce mélange s'étale bien pour enrober les barres d'armature, présentent peu de rebonds et peu de vides de compaction sont notables. La phase 2 du projet a donc été orientée vers les mélanges ternaires qui semblent très prometteurs.

3.4 Campagne de validation pour usage en ingénierie - Phase 2

La phase 2 avait pour objectif d'explorer plus en profondeur les mélanges prometteurs de la phase 1 et de valider leur utilisation dans un contexte de génie civil ou de génie minier. Pour la validation d'une utilisation en génie civil, les essais supplémentaires sont relatifs à la durabilité alors que pour valider une utilisation en génie minier, les essais de la phase 2 concernent les résistances au jeune âge avec accélérateur de prise. Aussi, un seul ajustement a été étudié pour cette phase, soit celui qualifié « idéale » à la section 3.3.4. Finalement, le changement de granulométrie a permis l'utilisation de la lance longue qui est plus représentative des chantiers québécois, la granulométrie du sable à béton a été modifiée.

3.4.1 Matériaux

Les matériaux de la phase 2 ont encore une fois été ensachés par Matériaux King et Compagnie à leur usine située à Boisbriand, à l'exception de la poudre de verre qui provient encore une fois du centre Tricentris. L'accélérateur de prise utilisé pour certaines projections est de type carboxylate. Les matériaux utilisés et leurs caractéristiques sont présentés au Tableau 3.9. et Tableau 3.10 et les fiches signalétiques ou autres renseignements techniques sont présentés à l'annexe B.

Tableau 3.9 : Matériaux de la phase 2

Matériaux	Caractéristiques
Sable à béton	Les granulats utilisés sont fournis par la compagnie King en provenance de leur carrière à Boisbriand. La granulométrie est présentée à l'annexe B.
Ciment	Le ciment est un ciment de type GU fourni par la compagnie King.
Fumée de silice	La fumée de silice utilisée pour cette phase est produite par la compagnie Silicium Québec et est fournie par Matériau King et Compagnie et provient de Silicium Québec.
Poudre de verre	La poudre de verre utilisée provient du centre Tricentris.
Accélérateur	L'accélérateur utilisé est conçu pour les mélanges en béton projeté par voie sèche et se présente sous forme de poudre. Il fait partie de la famille des carboxylates et le dosage est fixé à 2% de la masse du liant.

Tableau 3.10 : Caractéristiques principales des liants utilisés

	Ciment	Fumée de silice	Poudre de verre
SiO₂ (%)	19,6	94,3	74,07
Cl (%)	-	0,24	0,05
Al₂O₃ (%)	4,6	0,24	1,97
CaO (%)	60,6	0,64	13,56
Fe₂O₃ (%)	2,8	0,34	0,44
MgO (%)	2,6	0,25	1,26
K₂O (%)	-	0,6	0,62
Na₂O (%)	-	0,22	7,19
Na₂O_{eq} (%)	0,88	0,61	7,60
Surface spécifique Blaine (m²/kg)	376	-	382

3.4.2 Mélanges

Le mélange FS10 a été retenu comme seul mélange de référence de la phase 2 (pour les raisons évoquées à la section 2.4.2). Cette phase est la continuité avec la phase 1 qui a mis en évidence les bons résultats du mélange ternaire, à la différence de la phase 1, la phase 2 comprend deux mélanges ternaires dont les taux de remplacement cimentaire par la fumée de silice sont de 10% et 20%. Pour proposer des mélanges, dont les caractéristiques susceptibles d'intéresser le génie minier, deux mélanges ternaires ont été utilisés avec un agent accélérateur de prise et pour les mélanges pouvant intéresser le génie civil, un seul mélange ternaire a été utilisé, car ce projet met l'accent beaucoup plus sur le génie minier que civil. Les mélanges et leur identification sont présentés dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Compositions des liants utilisés dans les différents mélanges

Mélanges	Ciment type GU (%)	Fumée de silice (%)	Poudre de verre (%)	Accélérateur de prise (% de la masse du liant)
FS10	90	10	-	-
PV10FS10	80	10	10	-
FS10A	90	10	-	+ 2
PV10FS10A	80	10	10	+ 2
PV20FS10A	70	10	20	+ 2

En laboratoire, un agent accélérateur de prise a été ajouté aux mélanges. Le Tableau 3.12 présente la nomenclature et la composition à sec de chacun des mélanges de la phase 2. La composition des mélanges est présentée en proportions massiques, car le rapport E/C est inconnu avant la projection. Il est à noter qu'aucun agent entraîneur d'air n'a été utilisé lors de ce projet.

Tableau 3.12 : Composition en proportions massiques des mélanges secs

Mélanges	Ciment type GU (%)	Fumée de silice (%)	Poudre de verre (%)	Sable à béton (%)	Accélérateur de prise (%)
FS10	17,69	1,97	-	80,34	-
PV10FS10	15,73	1,97	1,97	80,34	-
FS10A	17,69	1,97	-	80,34	+ 0,35
PV10FS10A	15,73	1,97	1,97	80,34	+ 0,35
PV20FS10A	13,76	1,97	3,93	80,34	+ 0,35

À titre indicatif, le Tableau 3.5 présente la composition des mélanges par mètre cube pour un rapport E/L de 0,40 et 3% d'air.

Tableau 3.13 : Composition théorique des mélanges pour un rapport E/L de 0,40

Mélanges	Liant (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Poudre de verre (kg/m ³)	Fumée de silice (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Granulat (kg/m ³)	Accélérateur de prise (kg/m ³)
FS10	426	383	-	43	170	1739	-
PV10FS10	419	335	42	42	168	1713	-
FS10A	426	383	-	43	170	1739	7,6
PV10FS10A	419	335	42	42	168	1713	6,7
PV20FS10A	423	296	85	42	170	1729	5,9

3.4.3 Essais

Les essais de résistance en compression, d'absorption, de composition en place et de rebond ont été conduits de façon identique aux essais de la phase 1. Les essais propres à la phase 2 sont décrits dans cette section.

3.4.3.1 Compression à jeune âge pour mélanges accélérés

L'essai de compression en jeune âge est inspiré de la méthode proposée par Heere et Morgan (2002). Dans un premier temps, le béton est projeté dans un moule en forme de prisme rectangulaire. Quelques minutes après la projection, le moule est démonté et l'éprouvette est recouverte d'une toile de jute humide et d'une pellicule de plastique. Lorsque l'échéance souhaitée est atteinte, l'éprouvette est placée dans l'appareil de mesure de résistance en compression.

L'évaluation de la résistance en compression des bétons en jeune âge diffère de l'évaluation de la résistance de bétons plus matures, puisque le carottage est une manœuvre qui risque d'endommager les jeunes échantillons dont les résistances sont encore faibles. C'est pour cette raison que l'évaluation des résistances à jeune âge est contrainte à l'usage de moules de projection. Or, l'inconvénient des moules en béton projeté est la fréquence des défauts (particulièrement aux coins, car les turbulences nuisent à l'évacuation du rebond). La méthode proposée par Heere et Morgan comprend des échantillons moulés et tient compte de ce problème, car elle permet de sélectionner les sections ne présentant pas de défauts. Ainsi, l'éprouvette peut être avancée ou reculée dans le montage de manière à ce que la zone en compression soit exempte de défauts. Le montage est schématisé à la Figure 3.13. La Figure 3.14 illustre le résultat obtenu après rupture. L'apparition des cônes de compression bien formés est un bon indice de la viabilité de l'essai.

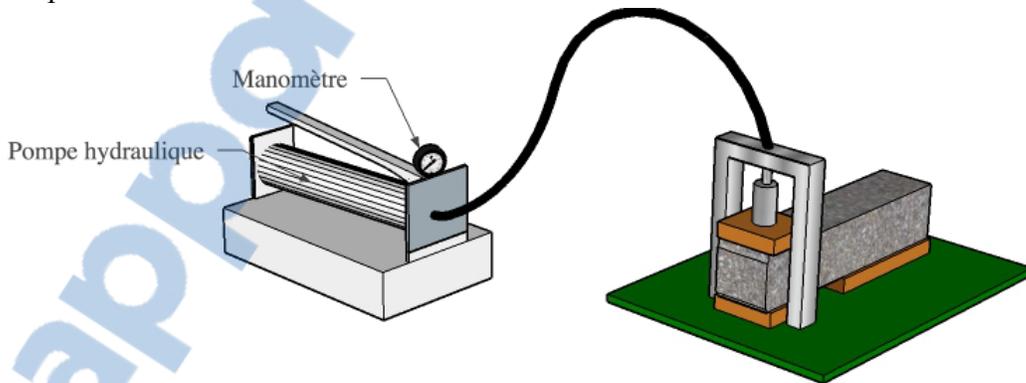


Figure 3.13 : Montage pour la mesure de résistance en compression à jeune âge

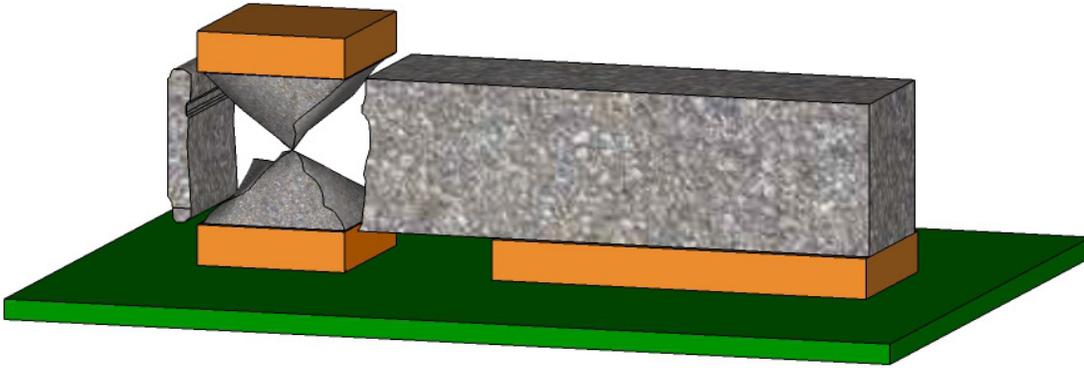


Figure 3.14 : Schéma de l'échantillon après rupture

3.4.3.2 *Gel-dégel*

Pour la confection des éprouvettes destinées à l'essai de gel-dégel, le béton est d'abord projeté dans un panneau comme celui présenté à la Figure 3.10. Une fois le béton durci, il est scié pour obtenir des prismes rectangulaires conformes à la norme ASTM 666. L'essai est ensuite conduit en suivant la procédure A de la norme ASTM C666.

3.4.3.3 *Écaillage*

Les échantillons d'écaillages sont directement projetés dans des moules en bois et l'essai est conduit selon l'annexe B de la norme NQ 2621-900/2002

3.4.3.4 *Pénétromètre*

Dans la phase 2, les essais au pénétromètre ont été conduits tels que décrits dans la section 3.3.3.2. Les mélanges avec accélérateurs de prise n'ont pas été soumis à l'essai, car la prise très rapide et la rigidité instantanée des mélanges empêchant la pénétration de l'aiguille.

3.4.3.5 Récapitulatif de la stratégie expérimentale de la phase 2

La seconde phase expérimentale a pour objectif de documenter le comportement des mélanges avec poudre de verre par rapport à une éventuelle mise en marché. Toujours dans l'idée de fournir des informations par rapport à des points de repère, le mélange FS10 a été choisi comme référence pour comparer et qualifier le comportement des mélanges PV10FS10 et PV20FS10. Le mélange de référence Ctrl a été mis de côté pour la seconde phase, car il a été jugé qu'un seul mélange de référence (FS10) était suffisant pour repérer les mélanges expérimentaux par rapport à ce qui est déjà sur le marché. La stratégie expérimentale de la seconde phase est présentée plus en détail au Tableau 3.14.

Tableau 3.14 : Synthèse de la démarche expérimentale de la phase 2

Hypothèse	Essai	Mélanges
L'accélérateur de prise permet aux mélanges avec poudre de verre de respecter les standards de l'industrie minière et même de surpasser les performances d'un mélange typique de l'industrie (FS10)	<ul style="list-style-type: none"> Résistance en compression (4h, 8h, 24h, 3j, 7j et 28j) Rebond Absorption 	<ul style="list-style-type: none"> FS10A PV10FS10A PV20FS10A
Un mélange avec poudre de verre peut être valide dans un contexte de génie civil	<ul style="list-style-type: none"> Résistance en compression (7 et 28 jours) Gel dégel Écaillage Absorption 	<ul style="list-style-type: none"> FS10 PV20FS10
L'interaction entre l'accélérateur de prise et la poudre de verre qui s'exprime par le biais les valeurs de rebond	<ul style="list-style-type: none"> Rebond 	<ul style="list-style-type: none"> FS10 FS10A PV10FS10 PV10FS10A PV20FS10 PV20FS10A
Les changements de composition en de la poudre de verre sur la composition en place sont plus prononcés lorsque le pourcentage de verre augmente	<ul style="list-style-type: none"> Composition en place 	<ul style="list-style-type: none"> FS10 PV10FS10 PV20FS10
L'impact de la poudre de verre sur les propriétés de béton frais est plus important lorsque le pourcentage de verre augmente	<ul style="list-style-type: none"> Pénétromètre Rebond Étalement latéral 	<ul style="list-style-type: none"> FS10 PV10FS10 PV20FS10

Chapitre 4 Présentation des résultats

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus lors de la campagne expérimentale présentés au Chapitre 3. Le chapitre suivant est organisé en fonction des deux phases du projet. Ainsi, la première partie présente les résultats des essais ayant pour but d'examiner les propriétés de quelques mélanges candidats et contrôle et la seconde partie présente les résultats obtenus pour la caractérisation des mélanges les plus prometteurs pour le génie civil ou le génie minier.

4.1 Phase 1

4.1.1 Composition en place

La composition en place est évaluée pour les quatre mélanges et pour les trois ajustements présentés à la section 3.3.4. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.1. Pour le moment, l'interprétation de ces résultats est délicate, car les proportions de matériaux constituant le béton en place sont fonction du type de liant dans la composition du mélange, de l'ajustement lors de la projection (la dynamique du phénomène de rebond est en lien avec plusieurs phénomènes concomitants). Le chapitre 5 propose des pistes d'analyse pour expliquer le comportement des différents mélanges lors de la mise en place.

Pour l'instant, il est intéressant de remarques que la densité granulaire aille généralement de pair avec un ajustement plus humide (mélange plus plastique, donc une meilleure retenue des granulats lors de l'impact). Outre cela, il est intéressant de remarquer que les rapports E/L les plus élevés ne correspondent pas nécessairement aux substrats dont les quantités d'eau par mètre cube sont les plus importantes (par exemple pour la fumée de silice, la quantité d'eau par mètre cube est pratiquement la même pour l'ajustement idéal et humide c'est la quantité de liant en place qui diffère d'un ajustement à l'autre). Le prochain chapitre traite ces comportements plus en détail.

Tableau 4.1 : Composition en place des mélanges en fonction des ajustements

	Ajustements	Granulats (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Liant (kg/m ³)	Rapport E/L
Ctrl	Sec	1580	228	562	0,41
	Idéal	1586	219	553	0,40
	Humide	1661	234	473	0,50
FS10	Sec	1554	202	593	0,34
	Idéal	1592	229	518	0,43
	Humide	1649	231	475	0,48
PV20	Sec	1522	220	593	0,37
	Idéal	1564	232	546	0,43
	Humide	1574	237	511	0,46
PV10FS10	Sec	1620	214	495	0,43
	Idéal	1583	229	497	0,46
	Humide	1594	242	462	0,52

4.1.2 Rebond

Les résultats de l'essai de rebond sont présentés dans le Tableau 4.2 et la Figure 4.1 présente ces résultats sous forme graphique. De manière générale, les résultats obtenus indiquent que plus la projection est humide, moins le rebond est important (ce qui correspond bien à ce qui est généralement observé en pratique). Un seul résultat fait exception : le 40% du mélange PV20. Ce résultat marginal est loin d'être sans intérêt et la section 5.4.3 propose des pistes de réflexion pour expliquer ce comportement.

Tableau 4.2 : Rebond en fonction des mélanges et ajustements

Ajustement	Ctrl	FS10	PV20	PV10FS10
Sec	36%	30%	37%	26%
Idéal	34%	26%	33%	22%
Humide	30%	25%	40%	22%

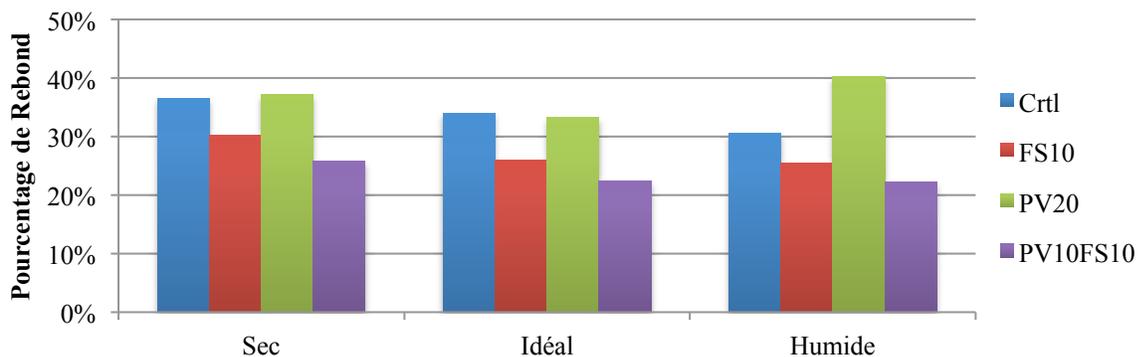


Figure 4.1 : Rebond en fonction des mélanges et ajustements

4.1.3 Consistance mesurée au pénétromètre

Afin de déterminer la résistance à la pénétration, des essais de pénétromètre ont été faits pour quatre mélanges et les trois ajustements. Les résultats sont présentés au Tableau 4.3 et la Figure 4.2. La consistance est le reflet de la maniabilité de mélange (les mélanges les plus maniabiles ont les consistances les plus faibles). Il est donc normal de voir cette consistance diminuer avec l'augmentation de la quantité d'eau. La fumée de silice semble avoir comme effet d'abaisser la résistance à la pénétration et il semble que la poudre de verre amplifie l'action de la fumée de silice (la synergie entre la poudre de verre et la fumée de silice est à remarquer tout au long de ce chapitre).

Tableau 4.3 : Résistance à la pénétration des différents mélanges et différents ajustements

Ajustement	Ctrl	FS10	PV20	PV10FS10
Sec	2,5	1,4	1,7	0,6
Idéal	1,6	0,6	1,2	0,3
Humide	1,4	0,4	0,9	0,2

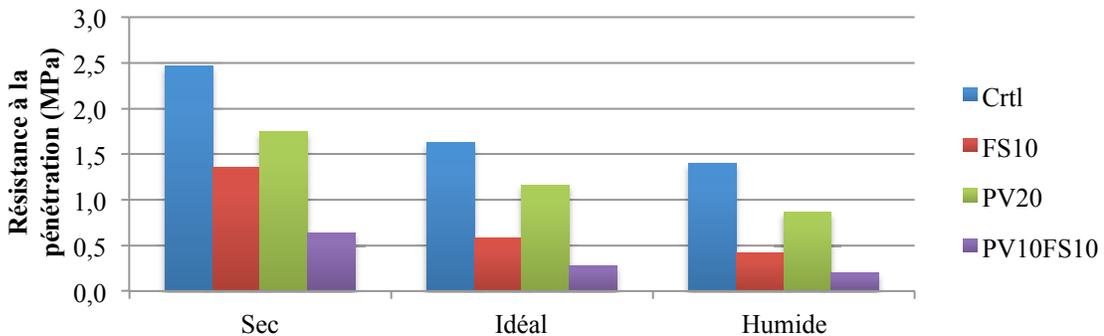


Figure 4.2 : Résistance à la pénétration des différents mélanges et ajustements

4.1.4 Étalement latéral

L'étalement latéral mesuré lors des projections est présenté au Tableau 4.4 et à la Figure 4.3. La tendance la plus importante révélée par les résultats indique que plus les mélanges sont humides, plus l'étalement est important; ce qui correspond aux attentes face à cet essai. Le second élément d'intérêt de ces résultats concerne la différence de sensibilité des différents mélanges par rapport aux changements d'ajustement.

Tableau 4.4 : Étalement latéral en fonction des mélanges et ajustements

Ajustement	Ctrl (mm)	PV20 (mm)	FS10 (mm)	PV10FS10 (mm)
Sec	10	10	8	9
Idéal	13	16	18	16
Humide	19	23	19	20

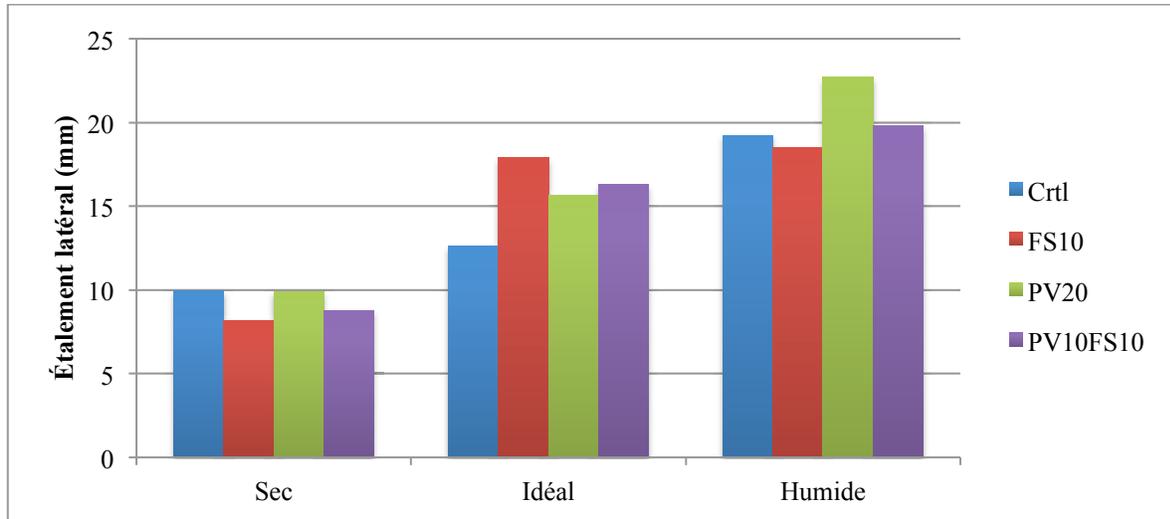


Figure 4.3 : Étalement latéral en fonction des mélanges et ajustements

4.1.5 Résistance en compression

Les résultats de résistance en compression ont été obtenus à 7, 28 et 90 jours et les résultats sont présentés au Tableau 4.5 et la Figure 4.4. Les résultats de résistance en compression représentent l'expression directe de l'effet combiné de différents paramètres (liant, l'ajustement de projection et qualité de la mise en place par projection pneumatique) et doivent être analysés en tenant en compte de ces facteurs. Par exemple, la tendance inattendue de la résistance en compression du mélange FS10 augmente avec l'ajout d'eau. Cette tendance doit être interprétée en tenant en compte la densité de granulats en place qui croît parallèlement à l'ajout d'eau (une densité granulaire plus forte favorise une meilleure résistance dans ce cas). Le Chapitre 5 propose une analyse approfondie et relève les tendances qui ressortent en fonction de la composition en place.

Tableau 4.5 : Résistance en compression à 7,28 et 90 jours

Mélange	7 jours			28 jours			90 jours		
	Sec	Idéal	Humide	Sec	Idéal	Humide	Sec	Idéal	Humide
Ctrl	42,6	35,3	42,0	43,2*	42,8	41,3*	54,8*	53,3*	54,2*
FS10	28,2	30,7	39,3	38,1*	39,3*	43,1*	53,4*	51,3*	57,7*
PV20	33,2	25,7	18,6	30,5	23,8	18,4	51,7	43,5	45,2
PV10FS10	39,2	29,4	18,6	54,6	41,8	39,1	55,0*	44,9*	40,4*

*Les résultats ont été rapportés aux dates mentionnées par régression linéaire (présenté à l'annexe C)

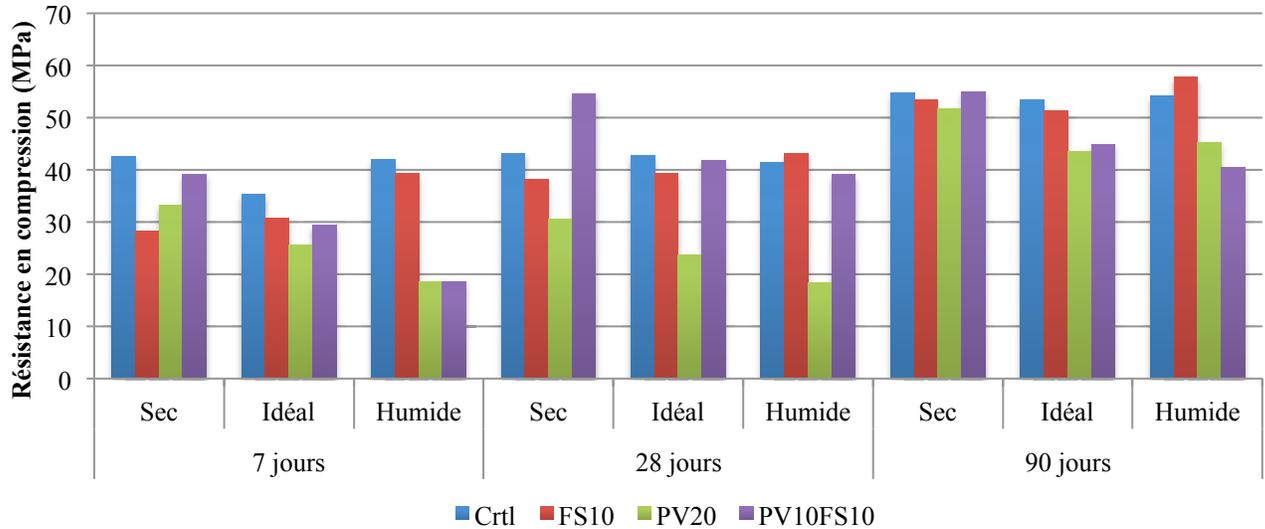


Figure 4.4 : Résistances en compression à 7,28 et 90 jours en fonction des ajustements

4.1.1 Masse volumique, absorption, et volume de pores perméables

Les résultats d'absorption obtenus varient entre 5,3 et 9,4 %, ce qui correspond à la plage de valeur habituellement rencontrée en béton projeté. Le Tableau 4.6 et à la Figure 4.5 présentent les valeurs obtenues pour chacun des mélanges à différents ajustements et les valeurs sont qualifiées en fonction des critères de qualité du Tableau 3.7. De manière générale, les absorptions des mélanges binaires et ternaires sont assez élevées par rapport aux critères établis. Les absorptions du mélange contrôle ont les valeurs les plus faibles, et ce à toutes les consistances.

Tableau 4.6 : Absorption en fonction des mélanges et ajustements

Ajustement	Ctrl	FS10	PV 20 %	PV10FS10
Sec	6,3 %	8,3 %	7,2 %	8,1 %
Idéal	5,9 %	8,1 %	8,0 %	8,7 %
Humide	5,3 %	7,3 %	8,8 %	9,4 %

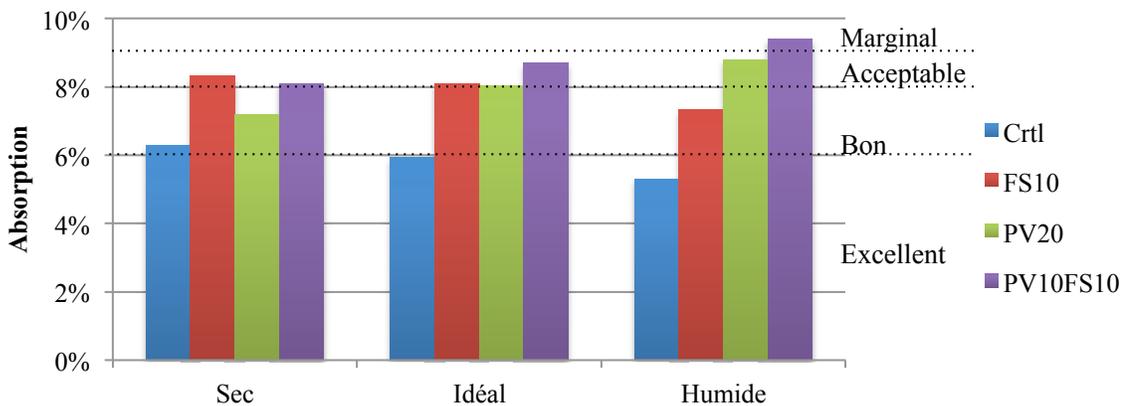


Figure 4.5 : Absorption en fonction des mélanges et ajustements

Les pourcentages de pores perméables sont présentés dans le Tableau 4.7 et à la

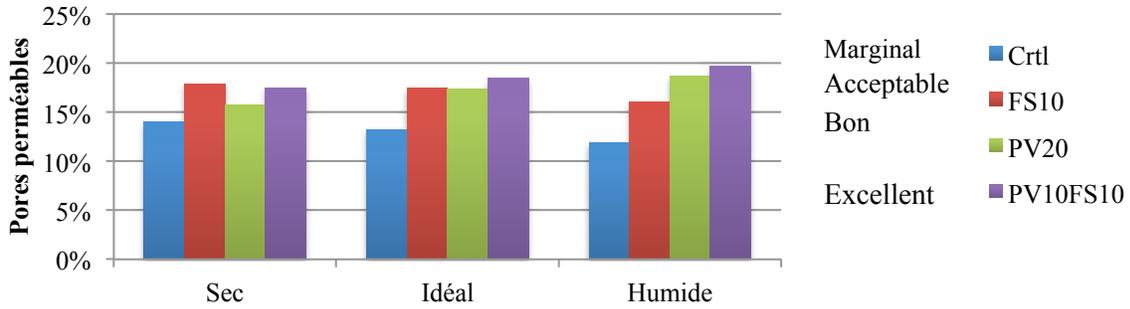


Figure 4.6. Encore une fois, les valeurs obtenues correspondent à la plage de valeur habituellement rencontrée en béton projeté. Les qualificatifs du Tableau 3.7 sont indiqués à la

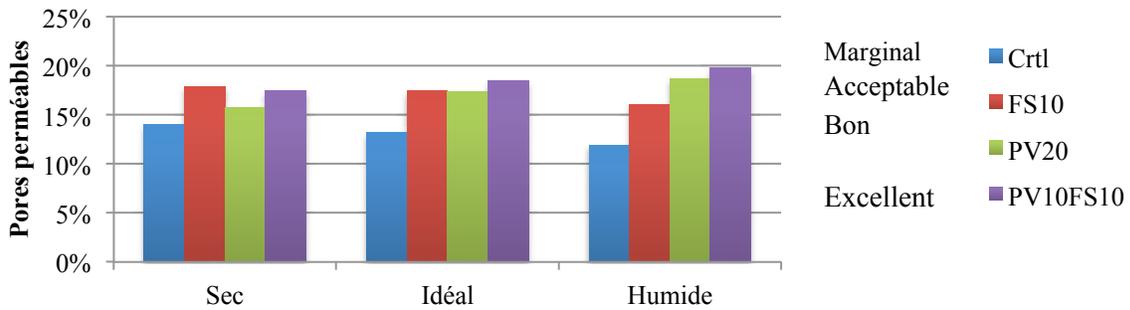


Figure 4.6.

Tableau 4.7 : Volumes de pores perméables en fonction des mélanges et ajustements (Essai ASTM C642)

Ajustement	Ctrl	FS10	PV20	PV10FS10
Idéal	14,0 %	17,9 %	15,7 %	17,4 %
Sec	13,2 %	17,4 %	17,4 %	18,5 %
Humide	11,9 %	16,1 %	18,7 %	19,7 %

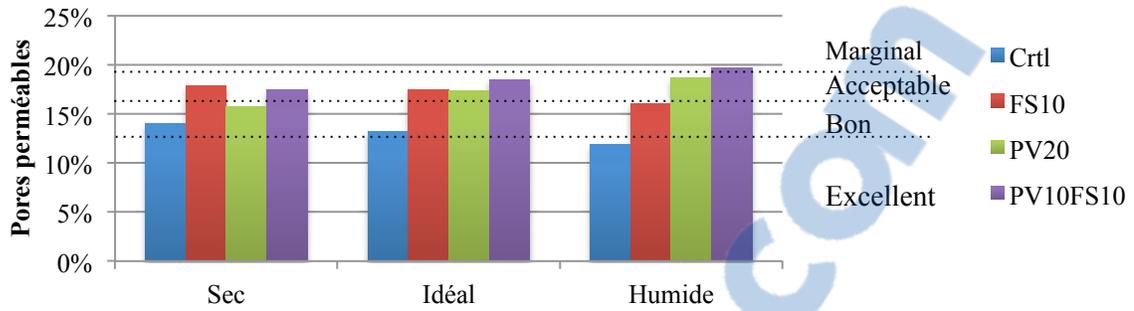


Figure 4.6 : Volume de pores perméables en fonction des mélanges et ajustements (Essai ASTM C642)

Les masses volumiques des différents mélanges sont présentées au Tableau 4.8 et à la Figure 4.7. Il semblerait que la tendance par rapport à l'ajout d'eau soit différente d'un mélange à l'autre. Le mélange Ctrl semble relativement stable en terme de densité malgré les différents ajustements, le mélange FS10 se densifie avec l'ajout d'eau alors qu'inversement, le mélange ternaire se densifie lorsque le mélange est plus sec. Encore une fois, ces résultats traduisent l'effet de plusieurs paramètres agissant conjointement (le type de liant, la composition en place et la mise en place pneumatique). Ces observations sont reprises au chapitre 5 et quelques discussions sont proposées pour expliquer les tendances observées.

Tableau 4.8 : Masse volumique des différents mélanges en fonction de l'ajustement

Ajustement	Ctrl	PV20	FS10	PV10FS10
Sec	2369	2340	2330	2330
Idéal	2357	2343	2333	2309
Humide	2368	2321	2355	2299

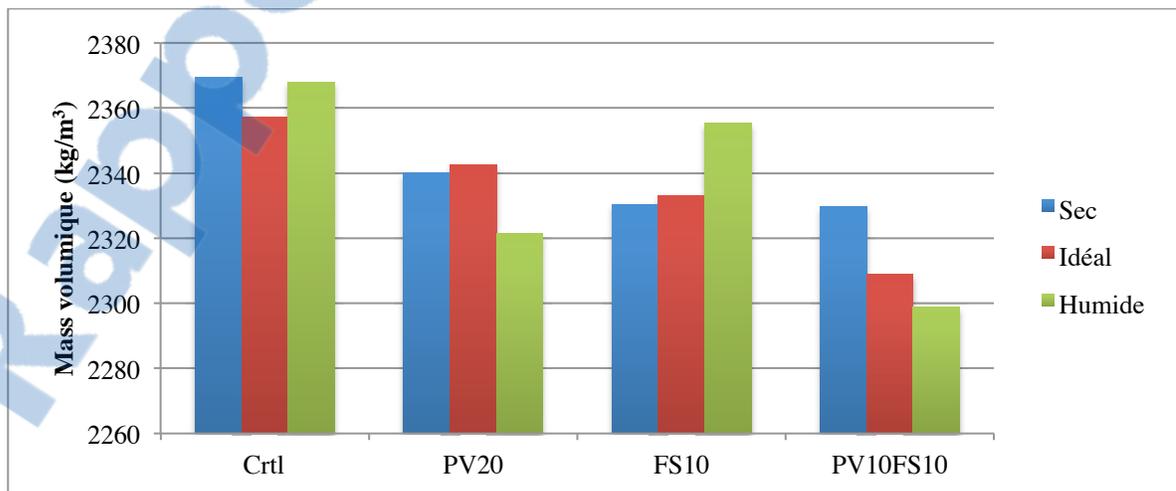


Figure 4.7 : Masses volumiques en fonction des mélanges et ajustements

4.2 Phase 2

Tel que mentionné à la section 3.4, la seconde phase se divise en essais sur mélanges accélérés pour des applications en génie minier et essais sur mélanges non accélérés pour des applications du génie civil. Pour des applications en génie minier, les trois mélanges accélérés ayant fait l'objet d'étude sont les suivants : FS10, PV10FS10 et PV20FS10. Pour les applications en génie civil, les deux mélanges étudiés sont FS10 et PV20FS10. Le mélange PV10FS10 non accéléré a été projeté et les résultats des essais sur béton frais ont été recueillis à des fins d'étude de nature académique pour mieux comparer les résultats (la durabilité n'étant pas l'objectif cible de ce mémoire, ce mélange n'a pas fait l'objet d'essais sur béton durci).

4.2.1 Composition en place

La composition des constituants en place est disponible pour les mélanges non accélérés uniquement. Malheureusement, l'accélérateur de prise provoque une prise trop rapide du béton pour permettre la réalisation des essais sur béton frais. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.9.

Il est intéressant de remarquer qu'il n'y a pas de corrélation entre l'augmentation de la proportion de poudre de verre dans le mélange sec et les proportions des constituants en place. Par exemple, en comparant FS10 et PV10FS10, il est possible de constater que les 10% de poudre de verre ont tendance à faire augmenter la densité granulaire alors qu'en comparant FS10 et PV20FS10, il est plutôt indiqué que les 20% de poudre de verre réduisent la densité granulaire. La cohésion globale de la pâte, l'adhérence des particules de verre et la demande en eau des mélanges de liant sont des pistes d'explications pour ces tendances qui sont discutées dans le prochain chapitre.

Tableau 4.9 : Composition effective après projection

Mélange	Granulats (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Liant (kg/m ³)	E/L
FS10	1649	212	478	0,42
PV10FS10*	1766*	196*	376*	0,52
PV20FS10	1583	249	521	0,48

*Le pourcentage des constituants a été recueilli directement après la projection; la valeur de masse volumique utilisée pour rapporter les résultats en kg/m³ est estimée en utilisant les résultats de la phase 1 pour ce mélange (aucun échantillon durci n'a été produit pour PV10FS10 lors de la phase 2. L'essai ASTM C-642 pour déterminer la masse volumique n'a pas été conduit)

4.2.2 Résistance en compression

Les résistances en compression du mélange PV10FS10 non accéléré n'ont pas été mesurées pour les raisons présentées à l'introduction de cette section. Les résultats obtenus pour les autres mélanges non accélérés sont présentés au Tableau 4.10. Les résistances en compression du mélange PV20FS10 sont inférieures au mélange FS10 d'environ 5MPa.

Tableau 4.10 : Résistances en compression à 7 et 28 jours pour les mélanges non accélérés

Mélange	7 jours	28 jours
FS10	33,3	45,1
PV20FS10	27,6	40,3

Les résistances en compression des mélanges accélérés sont présentées au Tableau 4.11. Une analyse sommaire des valeurs obtenues indique que la poudre de verre répond positivement à l'utilisation d'accélérateur de prise. Pour un pourcentage de remplacement de 20%, les résistances sont significativement plus élevées pour le mélange ternaire comparativement au mélange binaire (de fumée de silice uniquement). De plus la perte de résistance entre 28 et 7 jours est négligeable pour ce mélange contrairement au mélange de référence FS10. Le mélange PV10FS10 répond moins bien que le mélange FS10 à 3 jours, à 7 jours les résistances sont du même ordre et à 28 jours, la perte de résistance est inférieure pour le mélange comprenant 10% de poudre de verre.

Tableau 4.11 : Résistance en compression des mélanges accélérés à 3, 7 et 28 jours

Mélanges	3 jours	7 jours	28 jours
FS10	34,0	37,0	23,4
PV10FS10	25,8	34,3	30,9
PV20FS10	23,4	30,9	42,3

4.2.3 Résistance aux cycles de gel dégel - Mélanges non accélérés

Les résultats des essais de résistance aux cycles de gel-dégel sont présentés au Tableau 4.12. Il est possible de constater une légère hausse du module d'élasticité dynamique du béton pour l'ensemble des échantillons après 188 cycles. Il est possible que cette irrégularité soit due au changement de fournisseur de gelée de pétrole qui est survenu dans les mêmes dates. Bien qu'aucun des mélanges ne contenait d'agent entraîneur d'air, le comportement par rapport aux cycles de gel-dégel est satisfaisant.

Tableau 4.12 : Évolution des modules d'élasticité dynamiques des mélanges non accélérés au cours des essais de gel-dégel (ASTM C666)

Nombres de cycles	FS10 (%)	PV20FS10 (%)
0	100	100
14	96,9	98,9
44	98,7	100,9
80	98,2	97,9

116	97,1	99,0
152	99,4	99,3
188	95,9	97,3
220	104,1	103,1
256	101,8	100,4
288	101,3	101,5
324	102,2	99,5

4.2.4 Résistance à l'écaillage - Mélanges non accélérés

L'essai de résistance à l'écaillage s'est déroulé tel qu'attendu pour les mélanges FS10 tandis que pour le mélange PV20FS10 des imprévus survenus dans le comportement des deux échantillons : la solution saline percolait au travers des échantillons. Lors du conditionnement, il a été nécessaire de rajouter de la solution saline pour assurer la quantité minimale de solutions. De plus, lorsque les cycles de gel-dégel ont commencé, les échantillons perdaient toute leur solution environ en 24 h. Les côtés et le dessous des échantillons ont donc été scellés avec un mélange de silicone, de graisse et une pellicule plastique. Après le scellement, la suite de l'essai s'est poursuivie dans des conditions adéquates. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 4.8.

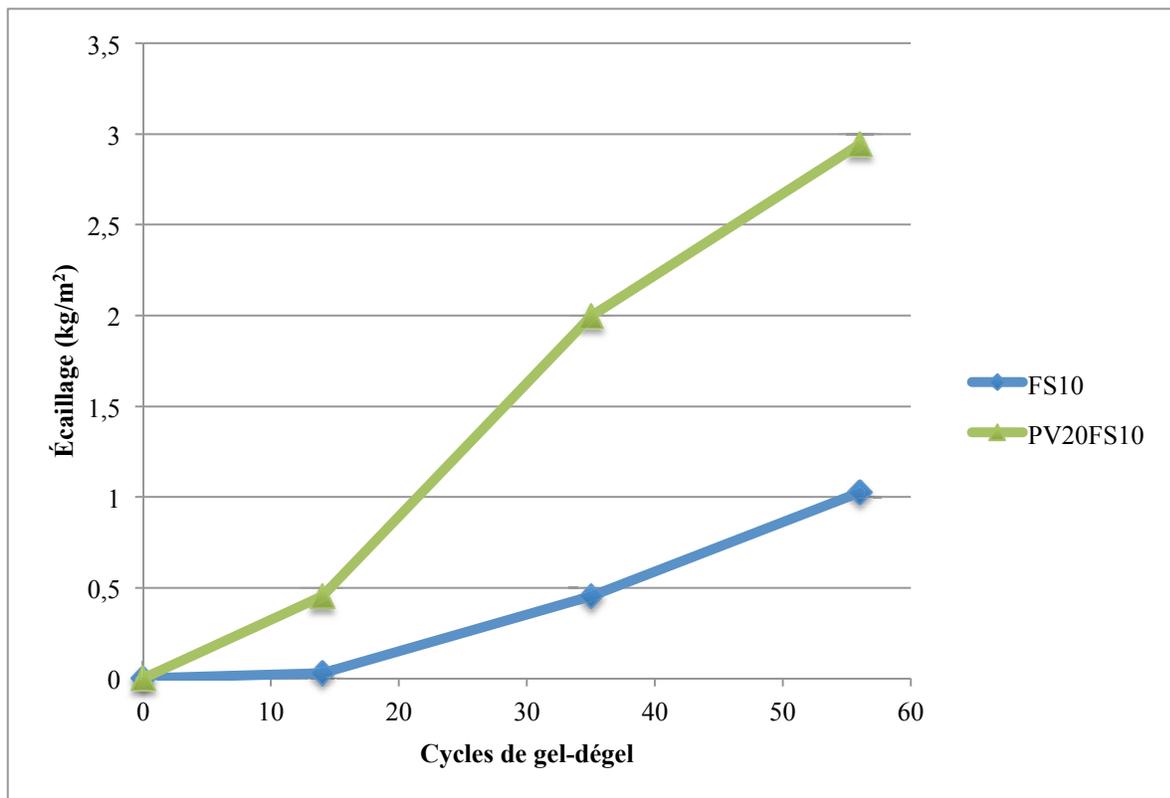


Figure 4.8 : Résultats de l'essai de résistance à l'écaillage des mélanges non accélérés (NQ 2621-900/2002)

4.2.5 Masse volumique, absorption et volume de pores perméables

Les résultats des essais d'absorption effectués sur les mélanges accélérés et non accélérés sont présentés au Tableau 4.13

Tableau 4.13 : Résultats des essais d'absorption des mélanges de la phase 2

	Mélanges	Absorption	Volume de pores perméables	Masse volumique (kg/m ³)
Non accéléré	FS10	8,5 %	18,3 %	2338
	PV20FS10	8,1 %	17,6 %	2354
Accéléré	FS10	7,3 %	16,2 %	2389
	PV10FS10	7,8 %	17,2 %	2375
	PV20FS10	7,9 %	17,2 %	2333

Rebond

Les mesures de rebond effectuées sur les mélanges non accélérés sont présentées au Tableau 4.14 et à la Figure 4.9. Il serait utile de mentionner que ces résultats ont été recueillis lors de nouvelles séries de projection. Ceci est dû à quelques problèmes lors de l'acquisition des données du moule de rebond lors des projections où les échantillons de bétons durcis ont été confectionnés. Ainsi, les mesures de rebonds des mélanges non accélérés lors des projections ayant servi à récolter les résultats des sections 4.2.1 à 4.2.5 ont dû être rejetées. La Figure 4.9 présente les résultats obtenus lors de la reprise de l'essai de rebond pour ces trois mélanges non accélérés. Quoi qu'il en soit, les résultats relèvent une interaction entre la poudre de verre et l'agent accélérateur de prise. En effet l'effet réducteur de rebond de la poudre de verre est perdu lorsque l'accélérateur est utilisé. Plus la proportion de poudre de verre est élevée, plus l'accélérateur a un effet néfaste sur le rebond.

Tableau 4.14 : Résultats de mesure de rebond des mélanges accélérés et non accélérés

Mélange	Accéléré	Non accéléré
FS10	34 %	26 %
PV10FS10	38 %	22 %
PV20FS10	31 %	12 %

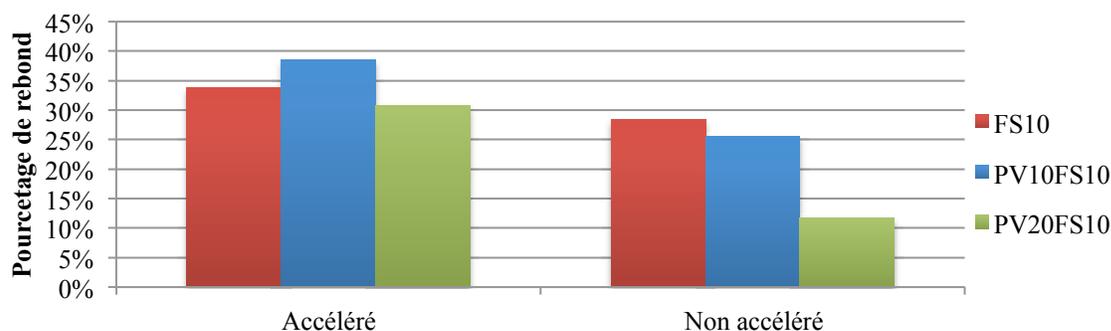


Figure 4.9 : Résultats de mesure de rebond des mélanges accélérés et non accélérés

4.2.6 Étalement latéral

Les résultats présentés au Tableau 4.15 correspondent aux mêmes séries de projections que celles des résultats des sections 0.

Tableau 4.15 : Étalement latéral des mélanges de la phase 2

Mélanges	Accélééré (mm)	Non accéléré (mm)
FS10	12,5	10,7
PV10FS10	0,0	15,0
PV20FS10	13,7	17,5

4.2.7 Résistance en compression en jeune âge - Mélanges accélérés

Les résistances à jeune âge des mélanges accélérés sont présentées au Tableau 4.16. À titre de rappel, cet essai rapporte des mesures prises sur des échantillons en forme de prismes et non de cylindres comme les échantillons plus matures. Les essais présentés ont été effectués conformément à la procédure présentée à la section 3.4.3.1.

Tableau 4.16 : Résistance en compression à jeune âge des mélanges accélérés

	4 heures	8 heures	24 heures
FS10	7,6	10,4	23,3
PV10FS10	5,0	7,9	23,8
PV20FS10	2,5	23,83,3	15,8

Chapitre 5 Analyse des résultats

5.1 Introduction

Les résultats du chapitre précédent prennent tout leur intérêt avec les analyses proposées dans ce chapitre. Les premiers sujets abordés concernent la composition en place, le rapport E/L, la consistance et le rebond. Cette partie de l'analyse permet de comprendre comment les paramètres ont influencé le rebond lors du programme expérimental. L'étalement latéral est ensuite traité pour enchaîner avec la résistance en compression qui est analysée en fonction des proportions du mélange en place et du comportement des liants dans le temps. Finalement, la durabilité sera abordée ainsi qu'une réflexion sur le déroulement des essais.

5.2 Demande en eau des mélanges

L'analyse d'un mélange de béton commence bien évidemment par la proportion d'eau intégrée au mélange. Ainsi, cette section se consacre à la quantité d'eau des différents mélanges pour un ajustement idéal. La Figure 5.1 présente les rapports E/L et la quantité d'eau par mètre cube des différents mélanges. Pour commencer l'analyse, il est intéressant de remarquer que certains indices laissent supposer que la quantité d'eau en valeur absolue (kg/m^3) est plutôt liée au taux de remplacement cimentaire et à la perception du lancier lors de l'ajustement. Les deux sections subséquentes tentent de départager l'influence de ces deux éléments sur la quantité d'eau en place.

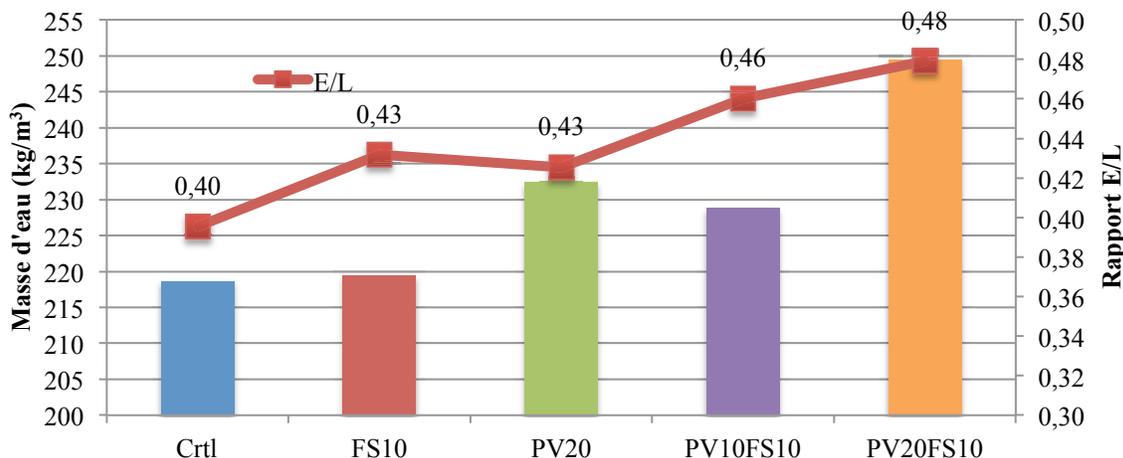


Figure 5.1 : Masse d'eau et rapport E/L des différents mélanges à ajustement idéal

5.2.1 Contribution du taux de remplacement sur la quantité d'eau en place (kg/m³)

En terme absolu, les mélanges demandant la plus grande quantité d'eau pour un même ajustement sont les trois mélanges comprenant de la poudre de verre. Ces trois mélanges ont également en commun des taux de remplacement cimentaire plus élevés. D'ailleurs, les deux mélanges dont le taux de remplacement est de 20 % ont des quantités d'eau par mètre cube semblables. Il est donc probable que la demande en eau de ces mélanges soit fonction du taux de remplacement. Ce qui est logique, puisque la poudre de verre et la fumée de silice ont toutes deux des densités plus basses que le ciment.

En d'autres termes, les mélanges avec remplacement cimentaire ont une plus grosse portion volumique de liant. Ainsi, moins le liant est dense, plus le lancier s'ajustera pour produire un béton dont la quantité d'eau par mètre cube est élevée (à titre indicatif les densités des liants sont présentées au Tableau 3.6). Bref, dans un contexte de béton projeté, la demande en eau globale d'un mélange n'est pas contrôlée par la demande en eau spécifique aux grains utilisés comme liant (activité de surface), mais c'est plutôt la densité du liant et le volume de pâte pour une même masse de liant qui contrôle ce paramètre.

5.2.2 Influence de la perception du lancier sur la quantité d'eau en place (kg/m³)

De manière *concomitante* au phénomène expliqué ci-haut, les observations de laboratoires permettent de supposer que l'ajustement appréciatif du lancier intervienne également pour déterminer la quantité d'eau par mètre cube des mélanges. Il est probable que les trois mélanges PV10FS10, PV20 et PV20FS10 ne soient pas influencés par les critères d'appréciation de la même façon que pour les deux mélanges témoins Ctrl et FS10. En fait, la rhéologie particulière de ces mélanges et la morphologie des particules de verre pourraient amener le lancier à incorporer davantage d'eau pour atteindre les critères d'un ajustement idéal.

Les mélanges de verre ont un comportement particulier lors de la mise en place. Ce comportement, qui s'apparente à de la thixotropie, est notable pour PV10FS10 et très évident pour PV20 et PV20FS10. Les observations indiquent que les mélanges de verre sont très fluides sous la projection (le lancier peut très facilement enfoncer ses doigts dans le mélange dans la seconde après que le jet ait été retiré et visuellement le substrat se déforme énormément sous l'impact des granulats) et se rigidifient rapidement après la mise en place (l'essai de pénétromètre est réalisé moins de trente secondes après la fin de la projection et le lancier peut déjà constater le changement de consistance entre le moment où il enfonçait ses doigts et le moment où il enfonce l'aiguille du pénétromètre). Ainsi, lorsque le matériel n'est plus sous le jet, la consistance change rapidement. La Figure 5.2 présente un schéma du phénomène décrit.

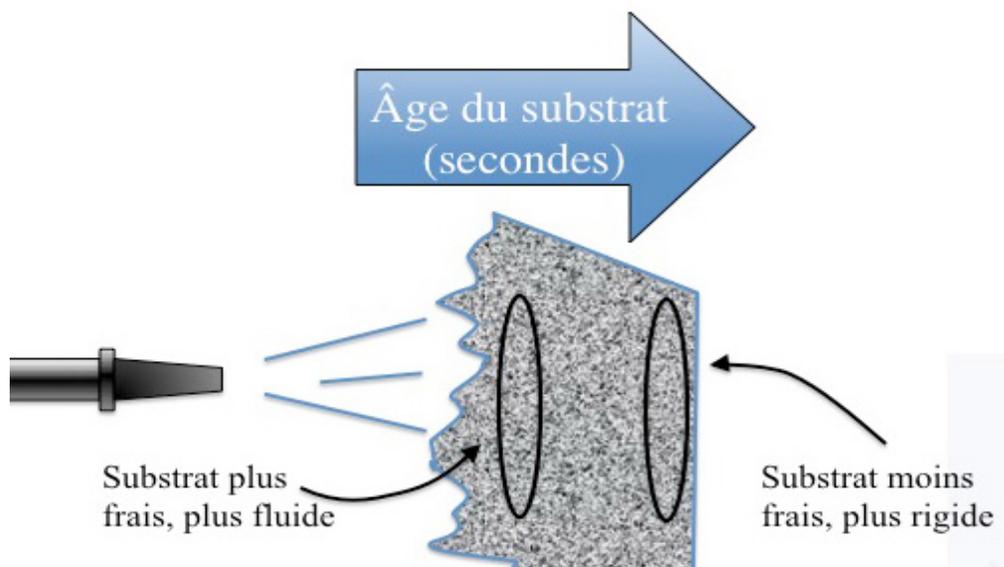


Figure 5.2 : Schéma du comportement s'apparentant à de la thixotropie

Le changement de consistance rapide dans un bref intervalle de temps apporte comme conséquence que la rigidification graduelle demande un substrat très fluide et très riche en eau, car cela compense la rigidification et permet l'accumulation au mur.

5.2.3 Rapport E/L

Contrairement à ce qui pourrait être instinctivement déduit, la Figure 5.1 montre que la quantité d'eau en valeur absolue (kg/m^3) n'est pas nécessairement liée au rapport E/L des mélanges en place. Par exemple, le mélange FS10 possède un rapport E/L significativement plus élevé que Ctrl, mais la quantité d'eau par mètre cube diffère peu. En fait, il semble que l'influence du liant sur le rapport E/L s'exprime parfois par le biais de la quantité d'eau et autrefois par le biais de la quantité de liant (voir la Figure 5.3). Ainsi, la plus forte demande en eau de la fumée de silice s'exprime par une plus faible quantité de liant comparativement à un mélange de ciment Portland (il y a deux leviers pour augmenter le

rapport E/L augmenter la masse l'eau ou diminuer la masse de liant). Comparativement, le mélange PV20 a une quantité de liant significativement supérieure aux trois mélanges avec fumée de silice. Ainsi, même si les mélanges avec poudre de verre semblent faire augmenter le rapport E/L (tout comme la fumée de silice), elle n'a vraisemblablement pas le même mode d'action (la quantité de liant diminue très peu par rapport au mélange contrôle). Ces observations permettent de constater que le rapport E/L correspondant à un ajustement idéal est fonction du type de liant. De plus, cette analyse permet aussi de s'attendre à ce qu'en situation de chantier, les ouvriers ajustent les mélanges ternaires avec des rapports E/L plus élevés que les mélanges binaires ou de ciment Portland ordinaire.

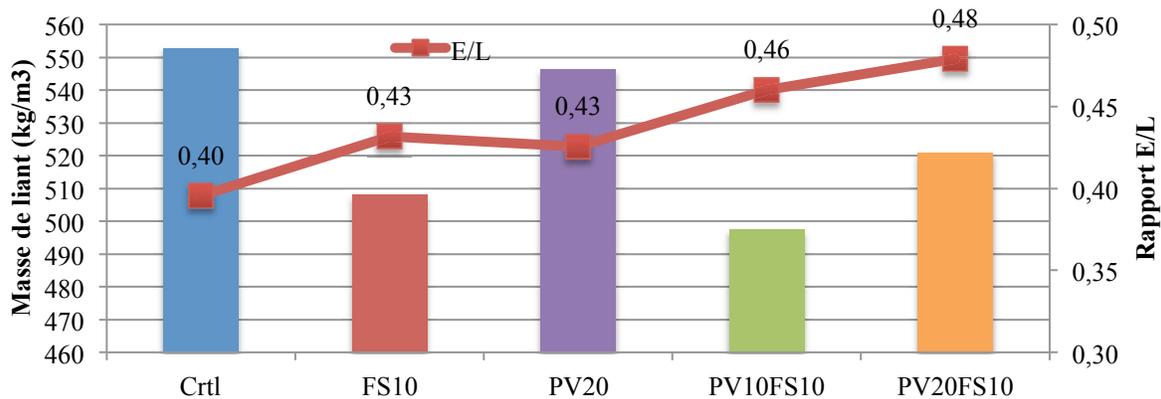


Figure 5.3 : Teneur en liant et rapport E/L des différents mélanges

5.3 Consistance et influence du rapport E/L

La consistance est un paramètre d'intérêt, car elle est étroitement liée au rebond (voir section 5.4). Ainsi, la compréhension des paramètres influençant celle-ci aide à mieux comprendre le phénomène de rebond. Il est intéressant de s'attarder au fait que la consistance est influencée par le rapport E/L (comme le montre la Figure 5.4); plus les mélanges ont des rapports E/L élevés, plus la résistance à la pénétration est faible. La notion de plage de consistances atteignables pour un mélange donné est un élément important de ce graphique (lorsque l'ajustement du mélange est trop sec la consistance est trop rigide et le substrat ne s'accumule ni n'adhère au mur tandis que les mélanges dont l'ajustement est trop humide donnent une consistance trop humide coulent sur le mur sans adhérer non plus). Les résultats présentés à la Figure 5.4 correspondent aux mesures prises pour les trois ajustements décrits à la section 3.3.4. En somme, les mélanges qui permettent une tenue au mur avec de grands rapports E/L sont également des mélanges qui présentent de très faibles résistances à la pénétration (ce qui se fait sentir sur le rebond).

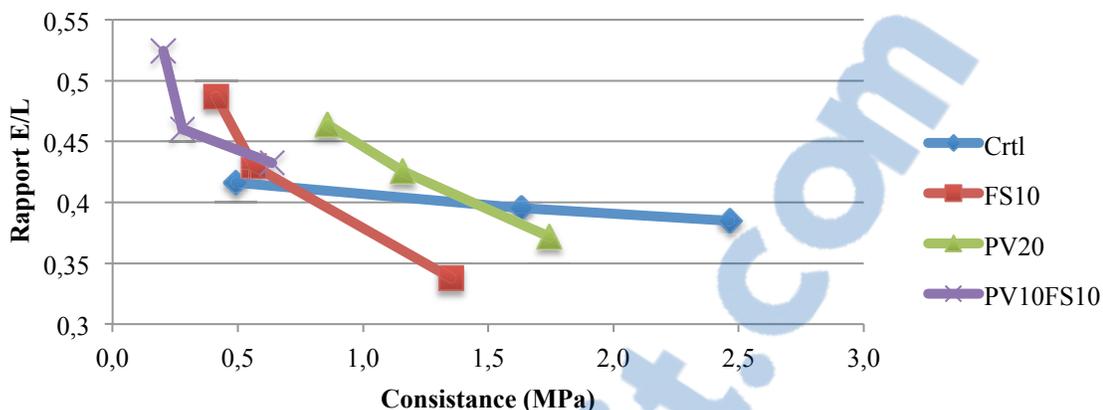


Figure 5.4 Relation entre le rapport E/L et la Consistance (MPa)

5.4 Rebond Phase 1

Lors de la phase 1, l'étude du rebond s'est consacrée à une meilleure compréhension des paramètres d'influence. Il s'avère que, tout comme la consistance et la composition du béton en place, le rebond est influencé par la nature du liant.

5.4.1 Rebond par rapport à la notion de consistance

La figure 5.5 présente la relation entre le rebond et la consistance mesurée au pénétromètre. Cette figure permet de constater que pour les mélanges Ctrl, FS10 et PV10FS10, les différents ajustements permettent de se déplacer sur droite quasi linéaire. L'élément important de ce graphique réside dans le fait que la nature du liant n'est pas un paramètre d'influence directe sur le rebond (sauf pour le mélange PV20 qui est discuté à la section 5.4.3). Bref, l'affinité des comportements des trois mélanges Ctrl, FS10 et PV10FS10 semble s'expliquer par le fait que le rebond soit exclusivement fonction de la consistance et indépendant du type de liant. Ainsi, le changement de la nature du liant permet simplement d'atteindre des consistances plus faibles pour les mêmes critères d'appréciation du lancier (voir la description des critères d'appréciation à la section 3.3.4).

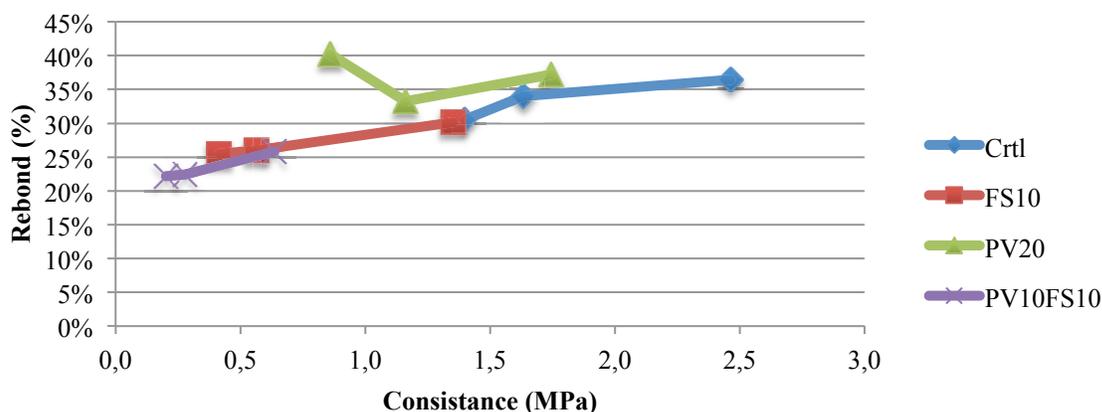


figure 5.5 : Rebond en fonction de l'ajustement pour différents mélanges

5.4.2 Conclusion partielle sur le rebond

Les sections 5.2 à 5.4 permettent de comprendre que : dans un premier temps, le rebond d'un mélange est fonction de la consistance, que la consistance liée au rapport E/L et finalement que la plage de consistance atteignable est bornée par la nature du liant.

Selon cette étude, l'optimisation du rebond ne passe pas la quantité d'eau par mètre cube d'un mélange. Conséquemment, l'optimisation du rebond passe par la conception d'un mélange dont le liant permet une bonne tenue au mur et une consistance faible.

5.4.3 Cas particulier de PV20

Bien que le rapport E/L soit plus élevé pour ce mélange que pour les autres ce paramètre n'influence pas le rebond de la même manière. Il est possible que dans le cas du mélange PV20 l'adhérence de la pâte et la rigidité du mélange expliquent la forme de la courbe observée à la figure 5.5 (la section 2.7.4 rappelle l'importance de l'adhérence de la pâte sur le rebond). À droite de l'optimum, le rebond augmenterait conjointement au raidissement du mélange (comportement cohérent avec ce qui est présenté aux sections 5.3 à 5.4.2). À gauche de l'optimum de la figure 5.5, le rebond augmente, car il est possible que l'adhérence diminue conjointement à l'ajout d'eau. Ceci serait dû au caractère inerte du verre qui, au contact de l'eau, ne présente aucune adhérence provoquant ainsi la baisse de rétention du matériel projeté et l'augmentation du rebond.

5.5 Rebond Phase 2

Puisque les mélanges ternaires de fumée de silice et de poudre de verre ont semblé intéressants lors de la phase 1, et que la phase 2 a comme objectif de vérifier quelques paramètres pouvant susciter un intérêt industriel, la phase 2 étudie le rebond avec différents dosages de verre dans deux mélanges ternaires et l'impact de l'ajout d'accélérateur de prise.

Avant de discuter de la phase 2, il est bon de rappeler les différences suivantes entre les essais de rebond de la phase 1 et 2 ont : les mélanges ont été projetés pour un ajustement dit idéal seulement (pas d'ajustement humide ou sec), la lance longue a été utilisée, un accélérateur de prise a été utilisé avec un dosage de 2 % par rapport à la masse de liant (pour certaines projections) et la granulométrie a été modifiée par rapport à la phase 1 (pour permettre l'utilisation de la lance longue plus fréquemment utilisée sur les chantiers).

5.5.1 Impact de l'accélérateur de prise sur le rebond

Les résultats présentant l'impact de l'accélérateur sur le rebond sont présentés à la Figure 5.6. L'usage d'accélérateur de prise augmente de façon significative le pourcentage de rebond pour tous les mélanges, ce qui était prévisible (voir la section 2.7.3). Au-delà de l'augmentation du rebond, il s'avère que les mélanges PV10FS10 et PV20FS10 semblent plus sensibles à l'usage d'accélérateur que le mélange FS10 (augmentation du pourcentage de rebond de 8 % pour FS10 et de 17 % et 19 % pour PV10FS10 et PV20FS10 respectivement). Le fait que le rebond augmente davantage avec l'accélérateur de prise pour les mélanges de verre laisse supposer que l'accélérateur interagit non seulement avec la poudre de ciment, mais également avec la poudre de verre (la nature de l'interaction est inexpliquée pour l'instant). Malgré cette interaction verre/accélérateur inattendue et difficile à expliquer, il s'est avéré que les trois mélanges accélérés ayant fait l'objet de l'essai de rebond ont des résultats semblables (voir Figure 5.6). Ainsi, en condition de chantier, l'usage de poudre de verre avec cet agent accélérateur de prise donnera des mélanges dont les performances au niveau du rebond sont semblables à celles des mélanges courants dans l'industrie.

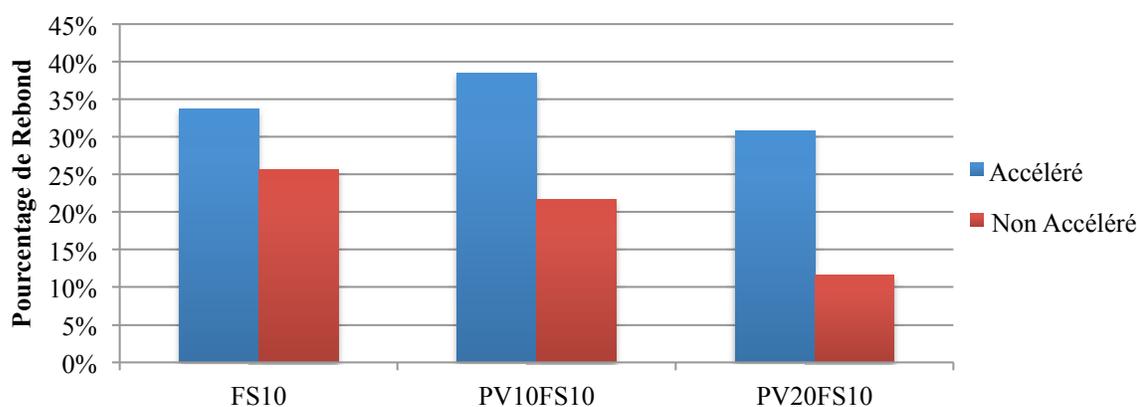


Figure 5.6 : Mesure de rebond des mélanges avec et sans accélérateur

5.5.2 Impact du dosage du verre sur le rebond

Les mélanges non accélérés présentent entre eux des différences de comportement très significatives. Il semble évident que, dans les mélanges ternaires, la poudre de verre permet



d'atteindre des consistances de projection qui favorisent de faibles rebonds (phénomène multifactoriel comme le mentionnent les sections 5.3 et 5.4).

Les résultats présentés démontrent qu'en condition de chantier, l'usage de la poudre de verre sans agent accélérateur de prise aurait un impact très positif sur le rebond si le mélange comprend de la fumée de silice. Une hypothèse pour expliquer les résultats des mélanges ternaires est que la fumée de silice garantit l'adhérence de la pâte, tandis que le verre assure un substrat très plastique lors de l'impact des granulats qui s'y encastreront pour y rester.

5.6 Étalement latéral

L'importance de l'étalement latéral réside dans le fait que la mesure donne un indice sur la capacité d'un mélange à bien enrober les obstacles comme les barres d'armature lors de la projection. Plus l'étalement est élevé, plus les possibilités d'avoir un recouvrement adéquat sont élevées. Comme les autres essais sur béton frais, ce paramètre répond différemment en fonction de l'ajustement et de la nature du liant. La Figure 5.7 présente l'impact de l'ajustement sur les différents mélanges, cette image montre que plus l'ajustement est humide, plus le mélange aura tendance à s'étaler latéralement. Cette tendance est évidente pour tous les mélanges.

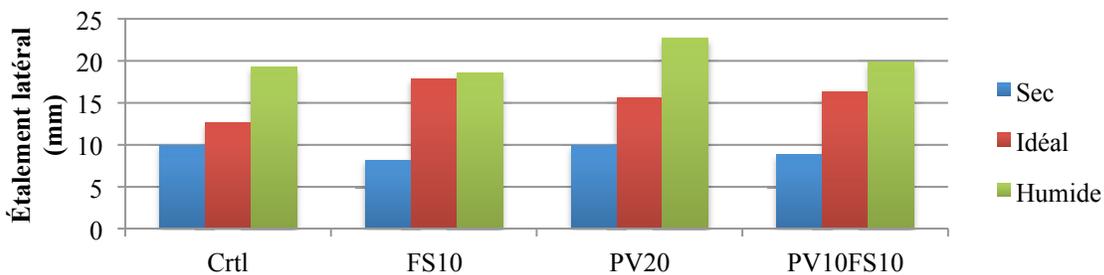


Figure 5.7 : Étalement latéral des différents mélanges en fonction des ajustements

5.7 Résistances en compression par rapport à la composition en place

La composition en place est un paramètre clé pour saisir les résultats obtenus et apprécier l'analyse qui est adaptée au contexte du béton projeté. La section à venir propose une analyse des résistances en compression et pointe les paramètres liés à la composition des différents mélanges en place.

5.7.1 Résistance en compression à 28 jours pour différents ajustements

La Figure 5.8 présente les résistances en compression des différents mélanges à différents ajustements. Cette figure permet de constater que les mélanges répondent différemment en

fonction des ajustements. En effet, les résistances du mélange Ctrl varient très peu en fonction de l'ajustement, alors que pour FS10 le passage d'un ajustement idéal à humide s'accompagne d'un gain de résistance et pour les mélanges PV20 et PV10FS10 des ajustements plus humides vont de pair avec une perte de résistance.

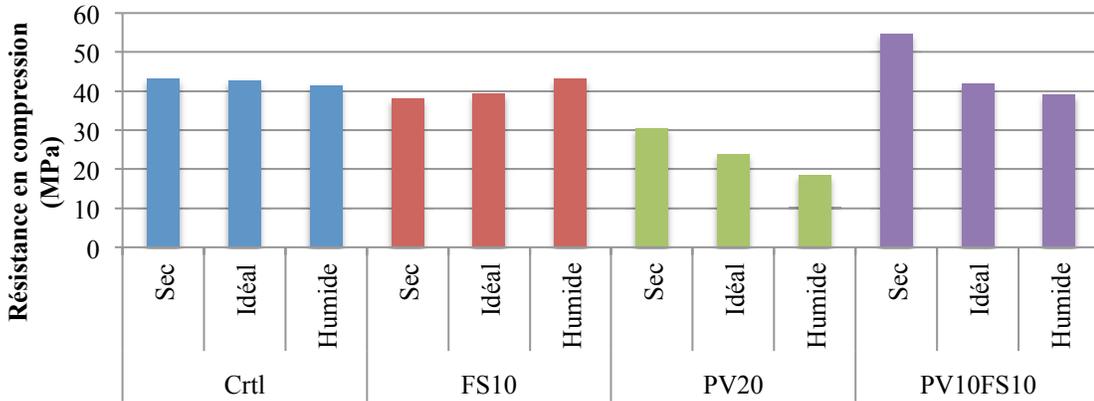


Figure 5.8 : Résistance en compression à 28 jours des différents mélanges à différent ajustement

La Figure 5.9 présente les mêmes résultats de résistance en compression que la Figure 5.8, mais en fonction des rapports E/L au lieu des ajustements (le mélange PV20FS10 est présenté à titre indicatif et fera l'objet de discussion à la section 5.7.2). Il est intéressant de noter que même si les mélanges ternaires comprennent plus d'eau et ont des rapports E/L plus élevés que le mélange de ciment Portland, les valeurs de résistance en compression sont du même ordre.

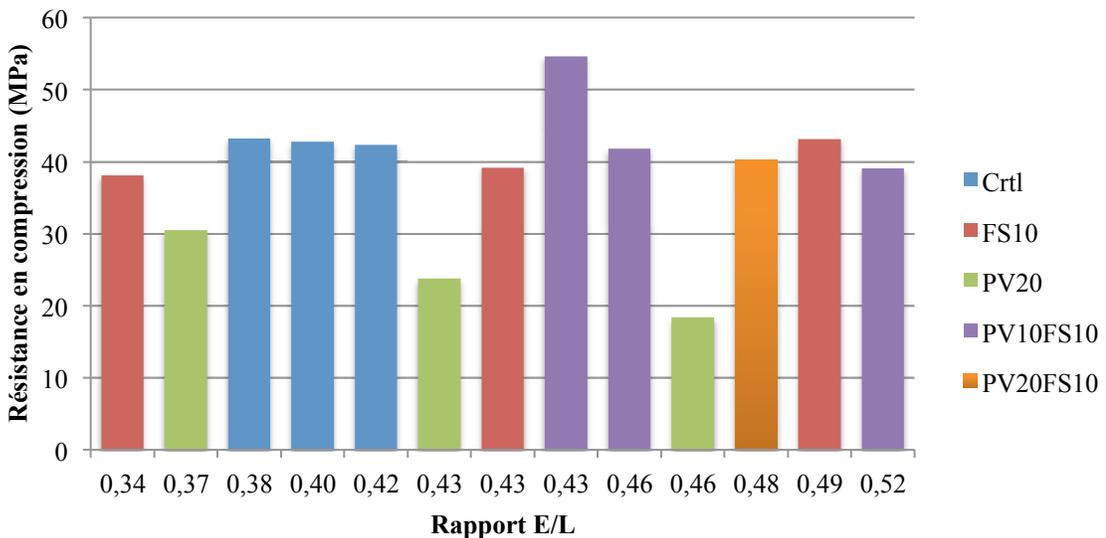


Figure 5.9 : Résistance en compression des différents mélanges en fonction du rapport E/L

5.7.1.1 Mélange Ctrl

Pour le mélange contrôle, la faible variation des résistances est probablement liée aux faibles variations du rapport E/L (voir Figure 5.9) et aussi des constituants (voir Figure 5.10). Il est intéressant de noter que pour l'ajustement plus humide est associé à une quantité plus importante de granulats en place qui, dans ce cas-ci, vient – probablement- améliorer la résistance en compression et expliquer la variation presque nulle de résistance en compression malgré l'augmentation du rapport E/L. Étant donné que les résistances en compression varient peu en fonction des ajustements, ces mélanges sont moins sensibles à l'expérience de l'ouvrier.

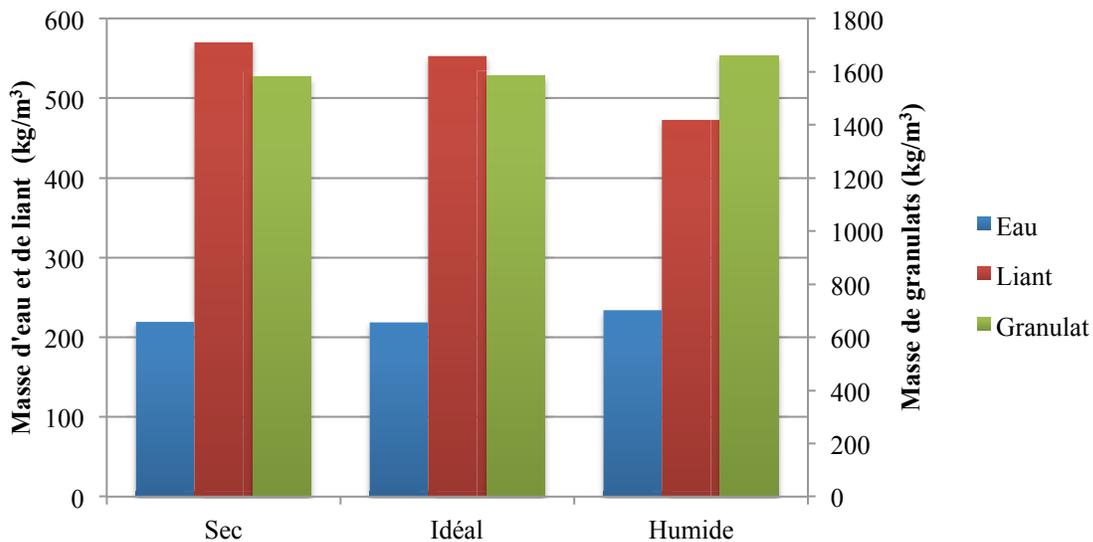


Figure 5.10 : Masse des constituants du mélange de référence en fonction des ajustements

5.7.1.2 Mélange FS10

Pour le mélange FS10 (voir Figure 5.11), tout comme pour le mélange Ctrl, un ajustement plus humide va de pair avec une augmentation de la quantité de granulats par mètre cube, la quantité d'eau dans le mélange n'est pas significativement plus élevée. Ces variations de composition en place sont probablement encore une fois en cause pour expliquer un gain de résistance malgré une hausse du rapport E/L. Bref, pour optimiser les performances de ce mélange en terme de résistance en compression, les lanciers doivent être bien informés de l'importance de favoriser un ajustement légèrement plus humide à un ajustement plus sec.

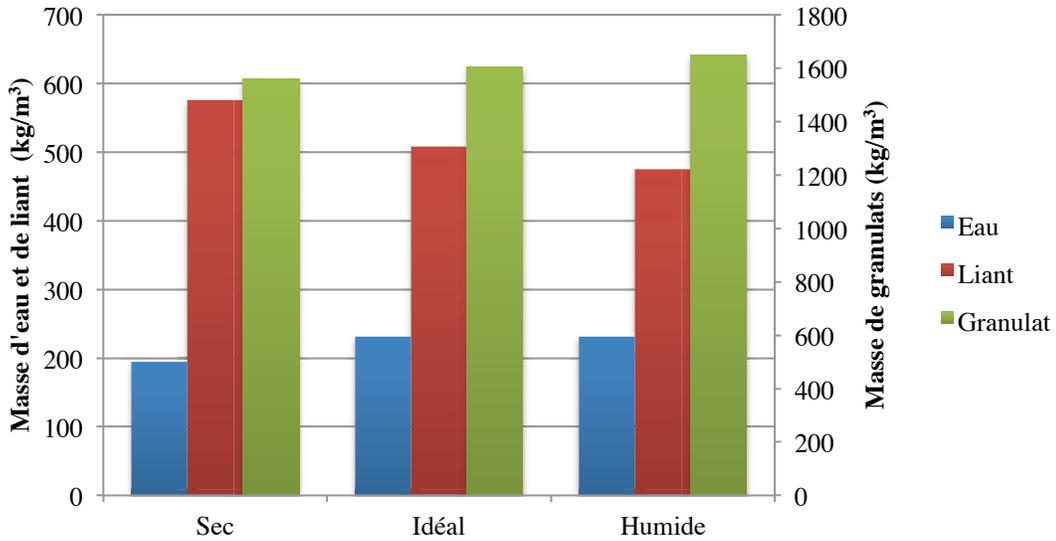


Figure 5.11 : Masse des constituants du mélange FS10 en fonction des ajustements

5.7.1.3 Mélange PV20

Pour le mélange PV20 (voir Figure 5.12), un ajustement humide est accompagné d'une augmentation de la quantité d'eau, d'une diminution de la quantité de liant et une faible variation de la quantité de granules. Puisque la densité granulaire varie peu, c'est le rapport E/L qui influence le plus fortement la résistance en compression. Ainsi, pour avoir des résistances optimisées en terme de résistances en compression, le lancier qui projette ce mélange doit être conscient que la règle de bonne pratique n'est plus d'ajuster à l'ajustement le plus humide qui soit acceptable, mais au contraire de favoriser un ajustement légèrement plus sec à un ajustement plus humide.

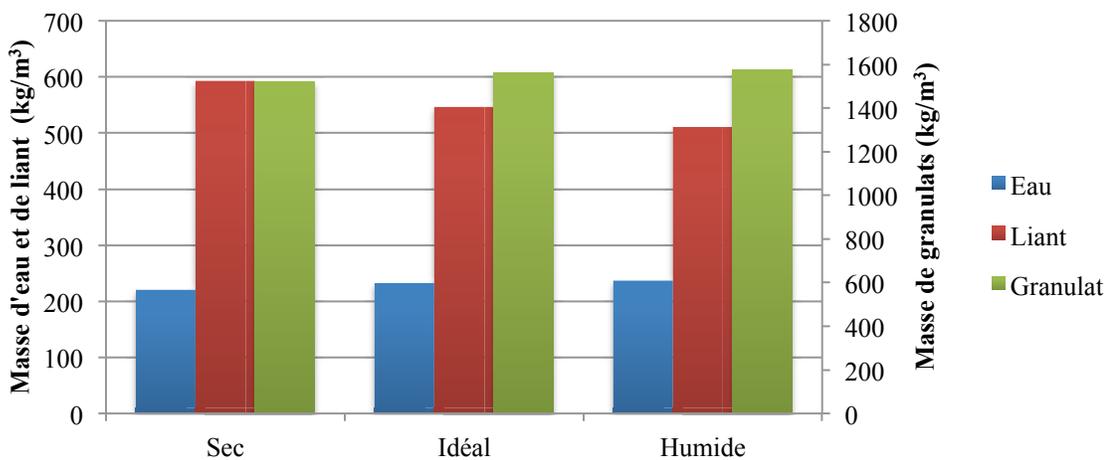


Figure 5.12 : Composition en place du mélange PV20 en fonction des ajustements

5.7.1.4 Composition mélange PV10FS10

Le mélange PV10FS10 (voir Figure 5.13) pour différents ajustements montre bien que l'enrichissement en eau s'accompagne d'une hausse du rapport E/L et d'une faible variation de la quantité de granulats. Cette modification de composition influence très probablement les performances de résistance en compression à la baisse. Ainsi, l'optimisation de l'ajustement de ce mélange, en terme de résistance en compression, serait comparable à l'ajustement du mélange PV20 et un ajustement légèrement trop sec serait à préférer à un ajustement plus humide. D'ailleurs, il serait bon d'établir des règles de bonne pratique propre aux mélanges avec poudre de verre et d'en informer le personnel de chantier.

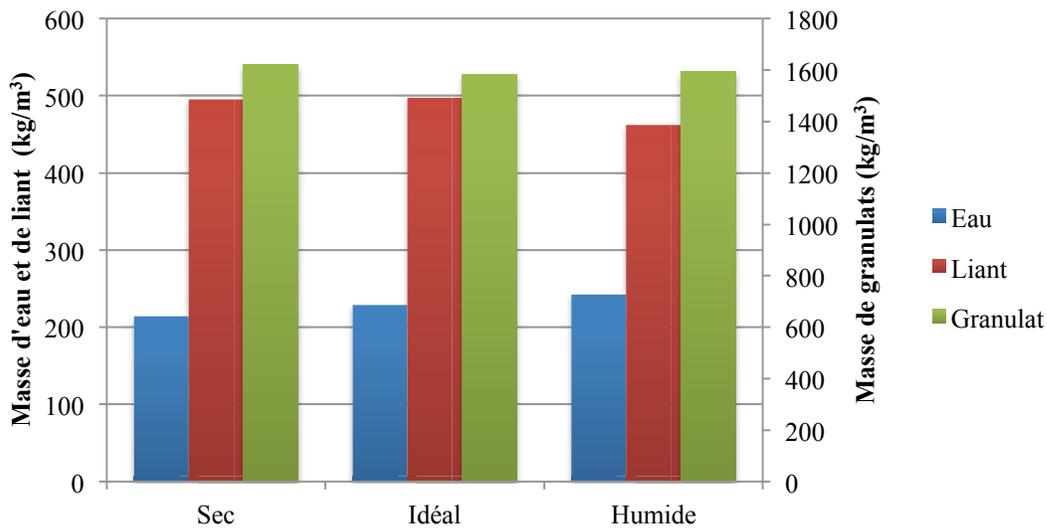


Figure 5.13 : Composition en place du mélange PV10FS10 en fonction des ajustements

5.7.2 Conclusion partielle

La nature du liant influence les proportions des composants du béton en place. Ainsi, indépendamment des caractéristiques structurales d'hydratation et de la dureté de la pâte formée avec différents liants, les mélanges présentent des différences en terme de résistance en compression qui sont influencées par le processus de mise en place.

Il semble que plus le mélange contient d'eau, plus celui-ci soit propice à retenir davantage de granulats et ainsi former un béton plus performant. Dans certains cas, le gain de résistance acquis avec une plus haute teneur en granulats compense la perte induite par une augmentation du rapport E/L (ex : Ctrl et FS10).

De plus, les mélanges PV20 et PV10FS10 ont des teneurs en granulats qui varient très peu en fonction de l'ajustement. La tendance possiblement thixotropique et la rigidification des mélanges mentionnées à la section 5.2.2 pourraient expliquer ce comportement. La rigidification induirait un taux de rejet des granulats relativement constant. Ainsi, puisque les mélanges contenant de la poudre de verre en béton projeté auraient tendance à avoir une proportion de granulats indépendante de l'ajustement, il serait donc préférable d'ajuster le

mélange avec le moins d'eau possible pour optimiser les performances en réduisant le rapport E/L.

Pour un ajustement idéal, les mélanges PV10FS10 et PV20FS10 se démarquent pour avoir des résistances en compression très similaire à celles des mélanges contrôles et ce, malgré le taux de remplacement cimentaire de 20 % et 30 % (il était attendu que le caractère pouzzolanique du verre ralentit l'hydratation et présente des résistances plus faibles à 28 jours par contre les valeurs ont du même ordre). Ni la composition en place ni les rapports E/L ne présentent d'écarts assez importants ou même cohérents pour expliquer la similitude des résistances entre les mélanges ternaires et les mélanges binaires. Une hypothèse intéressante pour expliquer cet écart de conduite serait un effet conjoint entre la fumée de silice et la poudre de verre. Si les résultats ne permettent pas de s'avancer sur le mécanisme de l'effet conjoint, la synergie entre le ciment Portland, la fumée de silice et la poudre de verre semble évidente dans cette campagne expérimentale.

5.8 Évolution de la résistance en compression

L'évolution de la résistance en compression permet davantage de commenter l'hydratation des différents liants. La Figure 5.14 présente les résistances en compression des mélanges à différentes échéances. La résistance du mélange PV20FS10 à 90 jours n'est pas disponible puisque ce mélange n'a été utilisé que dans la phase 2. Or, puisque cette phase était plutôt axée sur les besoins de l'industrie, le béton n'a pas été testé au-delà de 28 jours. Quoiqu'il en soit, plusieurs éléments ressortent de cette figure. Dans un premier temps, le gain de résistance de PV20 entre 28 et 90 jours est typique du comportement pouzzolanique attendu pour ce liant. Dans un second temps, les mélanges ternaires des pouzzolanes se comportent distinctement.

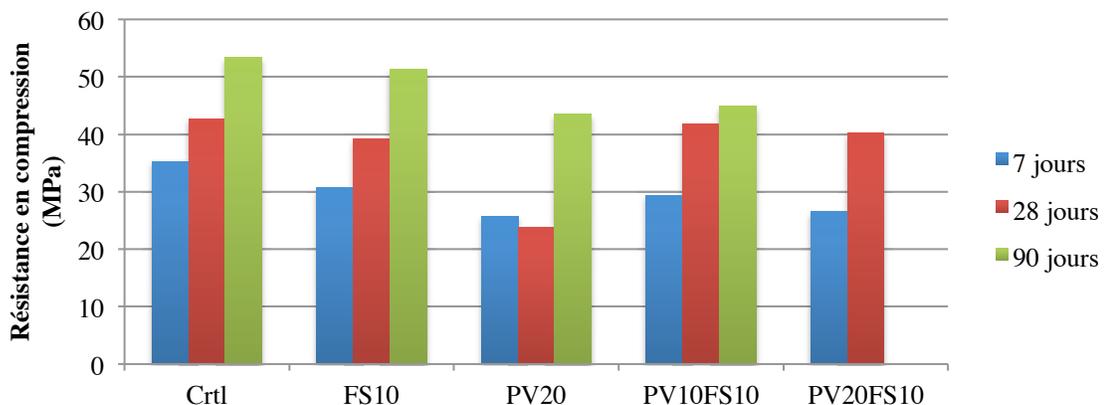


Figure 5.14 : Résistance en compression à 7, 28 et 90 jours

Pour les deux mélanges ternaires, il semble qu'une grande partie de l'hydratation se produise entre 7 et 28 jours, avec des gains de résistance de plus de 10 MPa. L'écart de comportement entre les mélanges binaires et les mélanges ternaires est un autre indice d'un effet conjoint entre la poudre de verre et la fumée de silice. L'effet dont il est question ici est un *effet accélérateur*, car le gain de résistance du mélange PV10FS10 entre 28 et 90 jours est faible, ce qui laisse supposer que l'hydratation se produit principalement avant 28 jours. Les résultats présentés dans ce tableau laissent présager que l'usage de la poudre de verre et de la fumée de silice ensemble permettrait de contourner la lenteur de mûrissement des bétons qui rend les mélanges binaires de poudre de verre moins intéressants pour certaines applications.

De plus, cet effet conjoint se fait sentir pour tous les ajustements. Comme le présente la Figure 5.15 : pour le mélange PV10FS10, la majorité de la résistance s'est développée dès 28 jours.

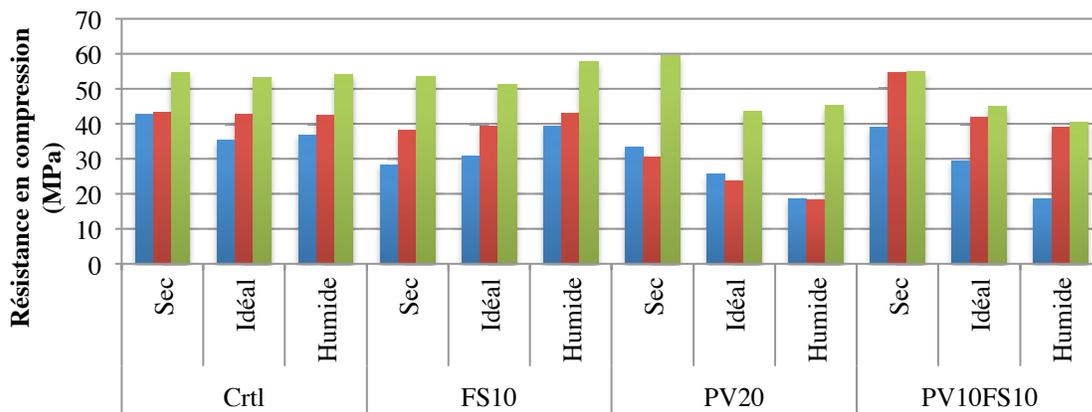


Figure 5.15 : Évolution de la résistance en compression des différents mélanges en fonction des ajustements

5.9 Résistance en compression et accélérateur de prise

Les résistances en compression des mélanges répondent toutes favorablement à l'ajout d'accélérateur de prise utilisé. Au jeune âge, il semble que le pourcentage de verre limite l'effet de l'accélérateur puisqu'à 4, 8 et 24 heures FS10 présente les meilleures résistances, PV10FS10 est au second rang et PV20FS10 présente les résistances les plus faibles. Il est possible que la poudre de verre n'interagisse pas avec l'accélérateur de prise dans les premiers jours. Cela expliquerait pourquoi les résistances de cet intervalle diminuent avec l'augmentation du remplacement du ciment par le verre. Il est intéressant de remarquer qu'à 28 jours, les résistances sont quasiment égales comme le montre la Figure 5.16 (les compressions en jeune âge sont présentées distinctement à la Figure 5.17).

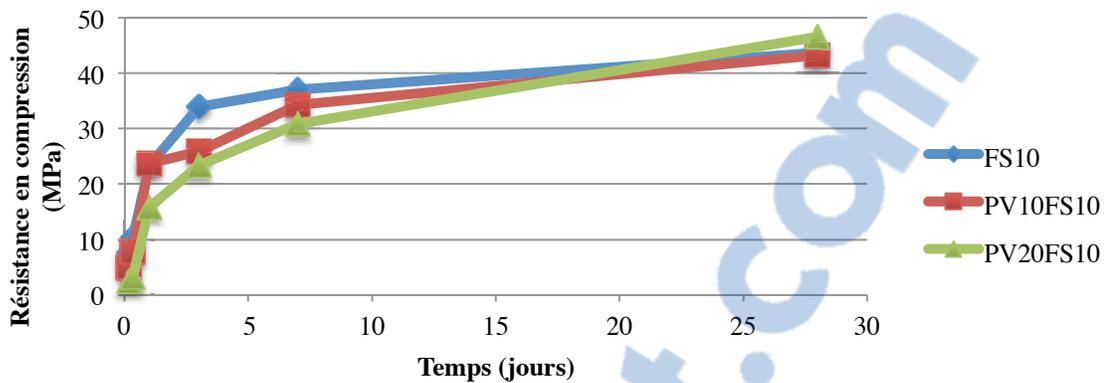


Figure 5.16 : Évolution de la résistance en compression des mélanges accélérés

5.10 Comparaison entre les critères de l'industrie minière et les résistances en compression obtenues

Les résultats des résistances en compression de la Figure 5.16 sont comparés aux standards typiques de l'industrie minière et sont présentés à la Figure 5.17. Cette figure indique qu'au jeune âge, le mélange PV20FS10 avec le dosage utilisé lors de l'étude est en deçà des standards de l'industrie. Le mélange PV10FS10 est très près du seuil d'acceptabilité avant 24 h et respecte le seuil minimal pour les autres échéances de temps. Ainsi, ce mélange présente des caractéristiques fort intéressantes pour un usage dans un contexte minier (à condition d'ajuster légèrement l'accélérateur pour hausser légèrement les résistances avant 24 h).

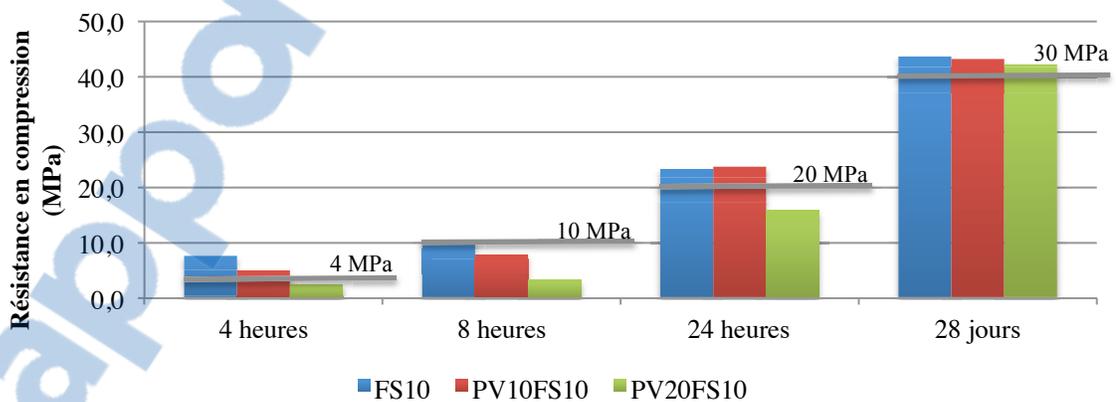
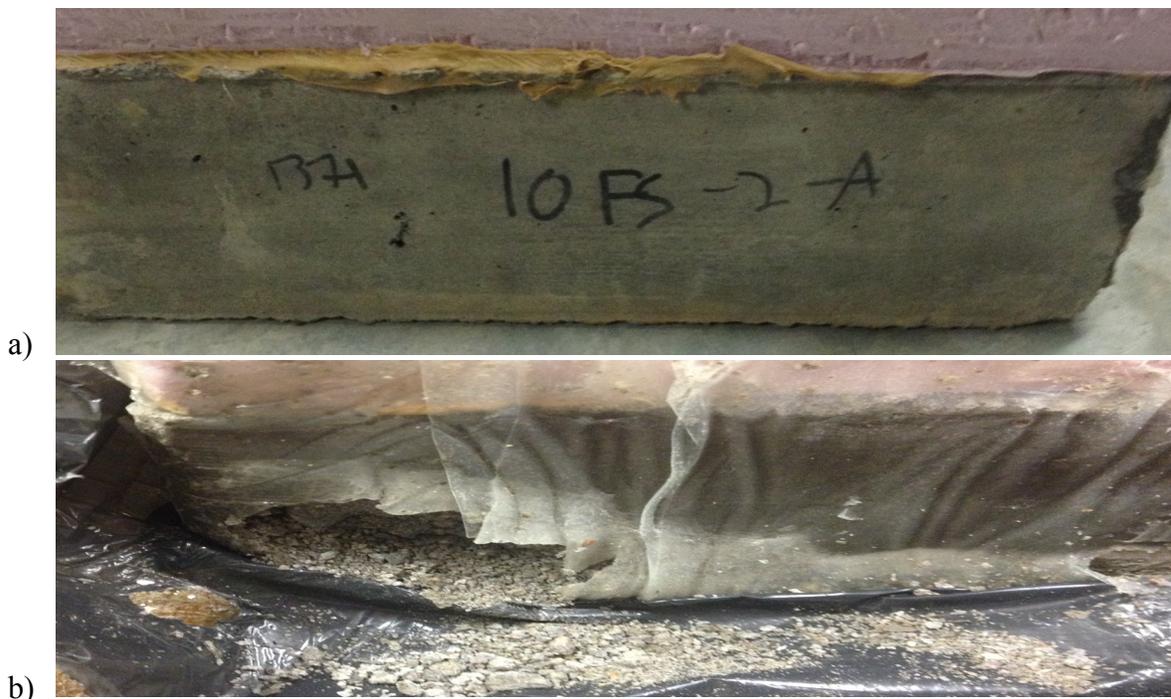


Figure 5.17 : Résistances en compression des mélanges accélérés par rapport aux critères de l'industrie minière

5.11 Discussion et comparaison entre les critères de génie civil et les résultats en lien avec la durabilité

Pour vérifier la durabilité des mélanges avec poudre de verre, les mélanges FS10 et FS10PV20 ont été soumis à deux essais : résistance aux cycles de gel-dégel et résistance à l'écaillage en présence de sels fondants. Les deux mélanges ont très bien résisté aux cycles de gel-dégel, mais lorsque les échantillons sont soumis aux essais d'écaillage, la durabilité semble compromise. Les deux mélanges FS10 et PV20FS10 ont échoué aux critères de durabilité à l'écaillage. En effet, le mélange PV20FS10 s'est comporté de manière très inattendue (tel que décrit à la section 4.2.4). Bien que les éprouvettes de tous les mélanges avaient un aspect visuel semblable au début de l'essai et que les mesures d'absorption étaient du même ordre (8,1 % pour les deux mélanges), de grandes différences de comportement sont ressorties entre les deux mélanges lors de l'essai. Cette section propose quelques pistes pour expliquer le comportement très singulier des échantillons du mélange PV20FS10.

La Figure 5.18 a) présente un échantillon du mélange FS10 à la fin de l'essai d'écaillage. Pour cet échantillon, l'aspect visuel des faces latérales n'a subi aucun changement entre le début et la fin de l'essai. Au début de l'essai, les deux échantillons du mélange FS10 et les deux échantillons du mélange PV20FS10 étaient similaires à l'échantillon présenté à la Figure 5.18 a). Les Figure 5.18 b) et c) présentent un des échantillons du mélange PV20FS10 à la fin de l'essai (la surface du dessus de l'échantillon est dégradée, mais pas autant que les faces latérales et le dessous).





c) Figure 5.18 : Aspect des éprouvettes à la fin de l'essai d'écaillage pour le mélange a) FS10 b) PV20FS10 avec le scellement et c) PV20FS10 après le retrait du scellement

Plusieurs hypothèses sont possibles pour expliquer ce qui a pu survenir. D'abord, une hypothèse en lien avec la structure physique du béton en place, c'est-à-dire que la mise en place par projection dans un moule relativement petit pourrait avoir fait en sorte que le béton soit moins bien compacté et consolidé dans les coins. Lors de la projection, si le rebond n'a pu être évacué hors du moule, il est resté accumulé sous forme de béton pauvre en pâte de ciment en périphérie. La Figure 5.19 schématise les problèmes de mise en place possibles liés au confinement en béton projeté. Le fait que le béton ait été projeté dans le moule est possiblement une piste de solution pour expliquer l'irrégularité du comportement de l'échantillon PV20FS10 (la mauvaise consolidation aux coins n'était, par contre, pas visuellement perceptible au début de l'essai). Toutefois, il est difficile de vérifier l'hypothèse de la mauvaise consolidation à ce stade, puisque l'absorption est mesurée sur une éprouvette provenant d'un autre panneau (la porosité du moule d'écaillage pourrait être différente de celle mesurée à partir d'un panneau plus grand).

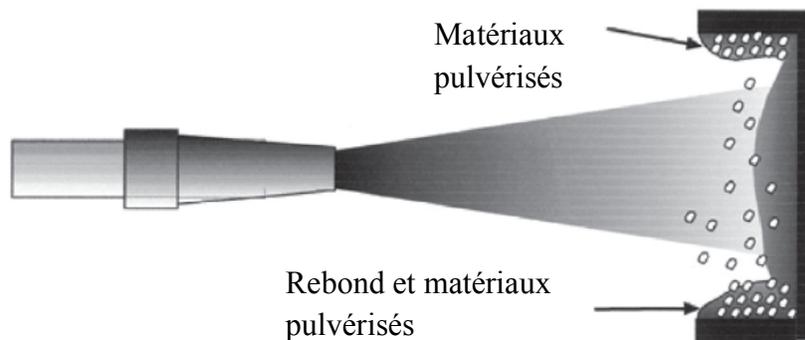


Figure 5.19 : Schéma d'une projection dans un moule restreint où le béton est moins riche en mortier en périphérie

Une autre hypothèse est en lien avec la solubilité de la poudre de verre. Les travaux de Saccani et Bignozzi (2010) apportent une piste de solution à cet égard, car ses mesures démontrent que la poudre de verre est plus soluble dans une solution saturée en chaux

contenant du sodium que dans une solution seulement saturée en chaux. Cette étude, à elle seule, n'est pas une réponse, mais plutôt une piste de réflexion pour expliquer la dégradation de la partie inférieure de l'éprouvette en présence de sodium.

Dans tous les cas, tel que présenté à la Figure 5.20, aucun des bétons ne satisfait les critères en terme de durabilité pour des bétons exposés aux sels de déglacage. Avant d'être employés pour des ouvrages exposés aux cycles de gel-dégel et aux sels de déglacage, les mélanges doivent être modifiés. L'usage d'agent entraîneur d'air pourrait avoir un impact significatif sur la résistance à l'écaillage des mélanges utilisés. D'ailleurs, une étude réalisée par Beaupré, Talbot et coll. (1994) suggèrent que l'usage d'agent entraîneur d'air augmente la résistance à l'écaillage de plusieurs mélanges à béton projetés par voie sèche.

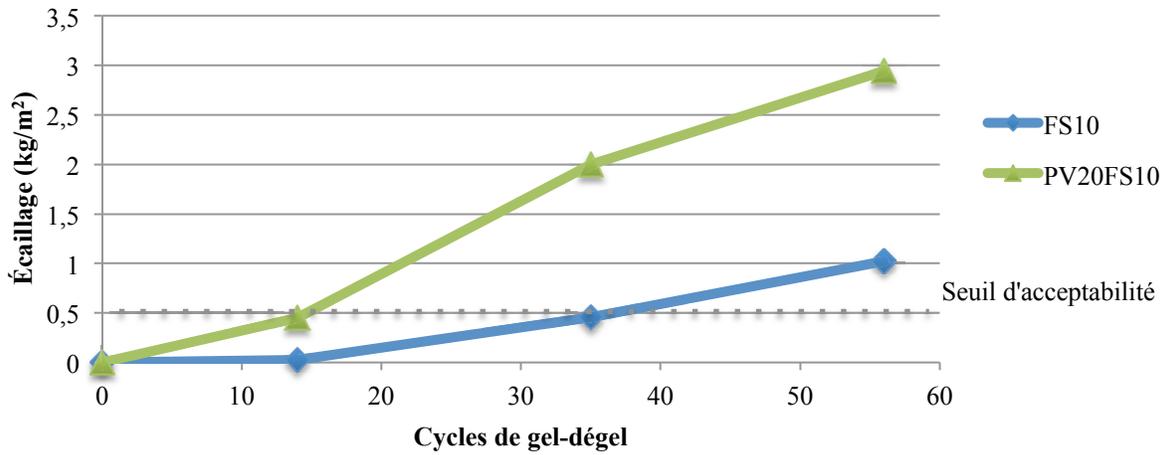


Figure 5.20 : Résultat de l'essai d'écaillage des mélanges FS10 et PV20FS10

Chapitre 6 – Conclusion

6.1 Introduction

L'objectif de ce projet de recherche était d'explorer le potentiel de la poudre de verre comme ajout cimentaire dans un contexte de béton projeté. Cette exploration a ensuite été orientée de manière à fournir des informations susceptibles d'intéresser les industries du génie civil et du génie minier. Ce chapitre présente, dans un premier temps, les conclusions du projet de recherche au regard des objectifs établis, ensuite quelques conclusions par rapport au potentiel de la poudre de verre comme remplacement cimentaire et propose finalement des pistes de recherche pour les travaux à venir.

6.2 Conclusions au regard des objectifs de recherche

6.2.1 Étudier l'effet de la poudre de verre comme ajout cimentaire sur la composition en place

Le premier objectif était d'étudier l'impact de la poudre de verre sur la composition en place des mélanges. Pour bien paramétrer l'influence du liant, les mélanges ont été projetés selon les règles de bonne pratique pour un ajustement idéal. Les conclusions par rapport à la composition en place sont les suivantes :

- plus le taux de remplacement cimentaire est élevé, plus la quantité d'eau par mètre cube augmente;
- les mélanges ternaires ont des rapports E/L nettement supérieurs aux bétons projetés usuels;
- le mélange binaire avec poudre de verre a un rapport E/L comparable à celui du mélange binaire avec fumée de silice;
- le comportement rhéologique des mélanges contenant de la poudre de verre influence la perception du lancier;
- pour les mélanges Ctrl et FS10, un ajustement plus humide est associé avec une plus forte densité granulaire; et

- pour les mélanges PV20 et PV10FS10, la densité granulaire varie peu en fonction des ajustements.

Ces conclusions permettent d'entrevoir que dans le cas d'une mise en marché des mélanges expérimentaux, les lanciers devront être sensibilisés au fait que les mélanges de poudre de verre répondent de manière différente de celles des mélanges couramment rencontrés en pratique. Suivant les propriétés recherchées pour le béton frais ou durci, la règle de bonnes pratiques consiste à viser l'ajustement le plus humide acceptable peut donner des mélanges dont les grandes quantités d'eau sont défavorables pour d'autres paramètres comme la résistance en compression ou la durabilité.

6.2.2 Étudier l'effet de la poudre de verre sur le comportement rhéologique du béton projeté

L'étalement latéral a été mesuré pour les différents types de liants et différents ajustements. Les conclusions tirées de cette série d'essais sont les suivantes :

- La poudre de verre bonifie l'étalement latéral des mélanges; et
- dans le cas de mélanges ternaires, l'étalement augmente avec l'augmentation du pourcentage de poudre de verre.

Les résultats de cette étude indiquent que l'usage de la poudre de verre peut diminuer les risques de mauvais enrobage des barres (et autres inclusions) avec des lanciers peu expérimentés qui seraient susceptibles d'avoir de la difficulté à bien ajuster le mélange. L'usage de la poudre de verre pourrait donc se révéler avantageux pour des utilisations où un bon enrobage des inclusions est difficile à atteindre.

6.2.3 Suivre l'évolution de la résistance en compression dans le temps

La résistance en compression est un aspect incontournable des mélanges de béton. Dans cette étude, il s'est avéré que le type de liant influence les résistances via la composition en place, mais également par le biais de l'hydratation des différents liants. Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- les mélanges ternaires de poudre de verre avec des rapports E/L de l'ordre de 0,50 ont des résistances en compression comparables aux mélanges contrôles dont les rapports E/L sont de l'ordre de 0,40;
 - il semble qu'il y ait un effet conjoint entre la fumée de silice et la poudre de verre qui bonifie les résistances en compression pour les mélanges ternaires;
- les mélanges ternaires ont un très faible gain de résistance en compression entre 28 et 90 jours (contrairement aux mélanges binaires), l'hydratation se produit principalement entre 7 et 28 jours;

- l'effet conjoint de la poudre de verre et de la fumée de silice est encore perceptible lorsqu'un agent accélérateur de prise est utilisé;
- plus le pourcentage de verre augmente, plus l'effet conjoint est prononcé;
- les mélanges contenant de la poudre de verre sont optimisés par des mélanges légèrement plus secs (ce qui demande une adaptation des règles de bonne pratique); et
- le mélange binaire de poudre de verre montre un gain de résistance en compression relativement peu élevée entre 7 et 28 jours, une partie importante de l'hydratation se produisant entre 28 et 90 jours.

Cette étude permet de mettre la lumière sur un effet conjoint particulièrement intéressant entre la poudre de verre et la fumée de silice. Aussi, l'étude permet encore une fois de s'avancer sur la règle de bonne pratique voulant un mélange projeté à l'ajustement le plus humide acceptable n'est pas nécessairement le meilleur guide lorsque des mélanges contenant de la poudre de verre sont utilisés (un bon ajustement d'un mélange avec poudre de verre devrait tirer vers un ajustement plus sec au lieu de plus humide).

6.2.4 Étudier la présence de poudre de verre sur le rebond

En béton projeté, le rebond est également une caractéristique importante des différents mélanges. Les différents ajustements, les différents types de liant et l'usage d'accélérateur de prise influencent fortement les valeurs de rebond. Voici les conclusions tirées de cette étude :

- lorsque couplée avec de la fumée de silice dans un mélange ternaire, la poudre de verre diminue remarquablement le rebond;
- plus la fraction de poudre de verre est élevée dans un mélange ternaire, plus le rebond est diminué;
- dans un mélange binaire, la poudre de verre produit des mélanges dont le rebond est très élevé; et
- en présence d'accélérateur de prise, les mélanges ternaires ont un taux de rebond comparable à celui d'un mélange avec fumée de silice.

Encore une fois, les mélanges ternaires présentent des avantages non négligeables, lorsqu'ils sont utilisés sans accélérateur de prise, ce qui les rend très intéressants pour l'industrie. Lorsqu'un agent accélérateur de prise est utilisé, les mélanges sont équivalents à la fumée de silice quant à l'aspect du rebond.

6.2.5 Vérifier si les bétons projetés par voie sèche permettent d'atteindre les exigences de durabilité pour une utilisation dans un contexte de génie civil

Pour un usage des mélanges en génie civil, les propriétés mentionnées ci-haut sont intéressantes, mais la durabilité est également un élément critique. Voici les conclusions tirées de l'étude de durabilité :

- le mélange ternaire avec poudre de verre résiste bien aux cycles de gel-dégel; et
- le mélange ternaire avec poudre de verre résiste très mal aux cycles de gel-dégel en présence de solution saline

Les mélanges avec poudre de verre tels que conçus ne sont pas encore prêts pour un usage sur des ouvrages exposés aux sels de déglacage.

6.2.6 Vérifier si les bétons projetés par voie sèche permettent d'atteindre les exigences pour une utilisation dans le contexte de l'industrie minière.

Pour un usage dans le domaine, les résistances en compression à jeune âge viennent compléter les informations déjà invoquées pour informer l'industrie des propriétés des mélanges avec poudre de verre et agent accélérateur de prise. Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- les résistances en compression mesurées à 8 h, 24 h et 28 jours satisfont les critères de l'industrie minière pour les deux mélanges ternaires avec poudre de verre;
- à 4 h, le mélange PV10FS10 est acceptable selon les critères établis, mais le mélange PV20FS10 est sous le seuil.

Les mélanges ternaires avec poudre de verre et fumée de silice pourraient être utilisés pour des projets courants lorsque le taux de remplacement du verre est de 10 %. Autrement, pour un remplacement cimentaire de 30 % (20 % de poudre de verre et 10 % de fumée de silice), le dosage de l'accélérateur de prise doit être optimisé pour atteindre les résistances attendues à 4 heures.

6.3 Conclusion sur le potentiel général de la poudre de verre en béton projeté par voie sèche

La fumée de silice met remarquablement en valeur les propriétés de la poudre de verre en béton projeté. Ainsi, les recommandations de cette étude quant à l'utilisation de la poudre de verre en béton projeté par voie sèche préconisent des mélanges ternaires avec de la fumée de silice. Des résultats aussi encourageants que ceux obtenus indiquent que l'utilisation du verre (conjointement à la fumée de silice) peut être une stratégie envisageable pour diminuer de 20 à 30% la quantité de ciment Portland. L'étude a ciblé

quelques mélanges dont les avantages environnementaux sont indéniables et les avantages économiques sont à considérer selon les projets. Les résultats obtenus dans ce travail de recherche indiquent que les avantages de l'utilisation de la poudre de verre sont plus importants dans le contexte de mélange ternaire. Les bonnes résistances en compression, l'augmentation de l'étalement latéral et la réduction du rebond sont les caractéristiques les plus intéressantes des mélanges étudiés.

Une des découvertes intéressantes du présent travail est le gain de résistance en compression dans le temps lorsque la poudre de verre est utilisée avec de la fumée de silice. Les deux matériaux ensemble atteignent presque la totalité de leur résistance en compression à 28 jours et ces résistances sont du même ordre de grandeur que celles des mélanges de ciment Portland uniquement.

Aussi, les mélanges ternaires de poudre de verre et de fumée de silice seraient également à recommander lorsque les obstacles à la projection ont des dimensions relativement importantes (larges barres d'armature). Les mélanges ternaires sont particulièrement à recommander pour réduire le risque d'un mauvais enrobage des obstacles, car ces mélanges s'étalent plus que tous les autres mélanges étudiés.

Finalement, les valeurs de rebond obtenues avec des mélanges à béton de poudre de verre et de fumée de silice sont remarquables. Pour l'instant, les mécanismes qui expliquent comment la poudre modifie la rhéologie lors d'une projection sont incertains, mais l'impact positif du matériel lorsque couplé à la fume de silice est indéniable. Les résultats de la présente étude indiquent que la poudre de verre peut sérieusement être considérée comme agent réducteur de rebond.

En contrepartie, les mélanges étudiés sans agent entraîneur d'air présentent de très faibles résistances à l'écaillage. Ce qui les rend beaucoup moins intéressants lorsque la durabilité est un critère important du béton à confectionner.

En conclusion, la présente étude a démontré que lorsque couplé à la fumée de silice, la poudre de verre est un matériau dont l'usage présente de nombreux avantages en béton par voie sèche. Dans la mesure où la durabilité n'est pas un critère (bon nombre de galeries minières), la poudre de verre, utilisée conjointement à la fumée de silice, permet des bétons plus respectueux de l'environnement sans avoir à faire de compromis sur la qualité du produit (au contraire) et dépendamment des ouvrages, l'impact économique de ce matériau peut s'avérer positif (rebond plus faible, gain rapide de résistance en compression et bon étalement latéral). Les raisons sont nombreuses pour poursuivre les recherches sur ce matériau plein de potentiel et surtout de l'utiliser pour certains ouvrages miniers dès demain.

6.4 Piste de recherches futures

Ce projet de recherche ouvre la porte à de nombreux projets pour de prochaines études sur les mélanges en béton projeté par voie sèche incorporant de la poudre de verre :

- L'effet conjoint entre la poudre de verre et d'autres ajouts cimentaires est à explorer. Cet effet conjoint se fait-il sentir de manière aussi significative avec des cendres volantes ou des laitiers de hauts fourneaux par exemple?
- Les mélanges ternaires ont été étudiés avec un pourcentage fixe de 10 % de fumée de silice. Des dosages plus faibles en fumée de silice plus faible sont à explorer, car il n'est pas impossible que la poudre de verre permette de réduire le dosage en fumée de silice pour d'aussi bonnes performances.
- Il pourrait être bon de vérifier si des accélérateurs de prise de nature différente influencent le rebond aussi négativement pour les mélanges ternaires que celui utilisé dans cette étude.
- Par rapport à la durabilité, l'usage d'un agent entraîneur d'air pour bonifier la résistance à l'écaillage doit être étudié. De plus, il serait très intéressant de vérifier la résistance à l'écaillage du mélange PV20FS10 lorsque les échantillons sont confectionnés de manière conventionnelle (pas en béton projeté) pour vérifier si la mise en place est bien en lien avec les irrégularités observées lors des essais.

BIBLIOGRAPHIE

ACI-506 (2009). Guide for Specifying Underground Shotcrete. A. C. Institute, American Concrete Institute.

Armelin, H. (1997). Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete. Département de génie civil, University of British Columbia, Canada: 262.

Armelin, H., Banthia, N. (1998). "Mechanics of Aggregate Rebound in Shotcrete Part I." Materials and structures **31**(2): 91-98.

Arrow, K. J. (2007). "Global Climate Change: A Challenge to Policy." The Economists' Voice **Volume 4**(Issue 3).

Austin, S. et P. Robins (1995). Sprayed Concrete : Properties, Design and Application. Loughborough, UK., Loughborough University of Technology: 382.

Barcelo, L., et coll. (2014). "Cement and carbon emissions." Materials and structures **47**(6): 1055-1065.

Beaupré, D., et coll. (1994). "Deicer Salt Scaling Resistance of Dry-and Wet-Process Shotcrete." ACI Materials Journal **91**(5).

Bolduc, L.-S. (2009). Étude des propriétés de transport du béton projeté. Département de génie civil et génie des eaux, UniversitéLaval, Canada: 155.

Cassar, J. et J. Camilleri (2012). "Utilisation of imploded glass in structural concrete." Construction and Building Materials **29**: 299-307.

Corinaldesi, V., et coll. (2005). "Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars." Waste Management **25**(2): 197-201.

de Castro, S. et J. de Brito (2012). "Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates." Journal of Cleaner Production **41**: 7-14.

EPA (2014). Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2012, United States Environmental Protection Agency.

Franzén, T. (1993). "Shotcrete for rock support: a summary report on the state of the art in 15 countries." Tunnelling and Underground Space Technology **8**(4): 441-470.

Gagnon, F., et coll. (2005). Potentiel d'utilisation des liants ternaires dans le béton projeté. 12e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art. Québec, Canada.

Heere, R. et D. R. Morgan (2002). "Determination of Early-Age Compression Strength of Shotcrete." American Shotcrete Association magazine(Spring): 28-31.

Hornweg, D. B.-T. P. (2012). What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management. 1, World Bank. **1**.

Ismail, Z. Z. et E. A. Al-Hashmi (2009). "Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete." Waste Management **29**(2): 655-659.

Johnston, C. (1974). "Waste glass as coarse aggregate for concrete." ASTM Journal of Testing and Evaluation **2**(5).

Jolin, M. (1999). Mechanisms of placement and stability of dry process shotcrete. Departement de génie civil, University of British Columbia, Canada: 152.

Jolin, M., et coll. (1999). "Tests to characterise properties of fresh dry-mix shotcrete." Cement and Concrete Research **29**(5): 753-760.

Jolin, M. et P. Lacombe (2000). "Le béton projeté: nouveaux développements et applications." Canadian journal of civil engineering **27**(2): 383-388.

Kara, P., et coll. (2012). "The Usage of Fluorescent Waste Glass Powder in Concrete." Construction Science **13**: 26-32.

Kosmatka, S., et coll. (2003). Contrôle et dosage des mélanges à béton. Ottawa, Canada, Association canadienne du ciment.

Mahasenan, N., et coll. (2003). The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions. Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference. J. Gale et Y. Kaya. Oxford, Pergamon: 995-1000.

Malone, C. (2014). "Green bond market predicted to grow to \$100bn in 2015." Retrieved 26 oct 2014, 2014, from <http://blueandgreentomorrow.com/2014/10/23/green-bond-market-predicted-to-grow-to-100bn-in-2015/>.

Malone, C. (2014). "Investors commit to expanding the climate bond market." Retrieved 26 octobre 2014, 2014, from <http://blueandgreentomorrow.com/2014/09/26/investors-commit-to-expanding-the-climate-bond-market/>.

Matos, A. M. et J. Sousa-Coutinho (2012). "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement." Construction and Building Materials **36**: 205-215.

Morgan, D. et J. Wolsiefer (1991). Silica fume in shotcrete. Proceedings CANTEM/ACI International Workshop on the use of silica in concrete, Washington, USA.

Morgan, D. R., N. McAskill, J. Neill N.F. Duke (1987). evaluation of silica fume shotcrete. International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete. Montréal, Canada.

Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. England, Pearson Education Limited.

Newswire, P. (2013). "iCrete - High Tech Concrete Gives Strength to the Freedom Tower." Retrieved 23-02-15, 2015, from <http://www.prnewswire.co.uk/news-releases/icrete---high-tech-concrete-gives-strength-to-the-freedom-tower-152447555.html>.

Nkinamubanzi, P.-C. et P.-C. Aïtcin (2000). "L'utilisation du laitier dans la fabrication du ciment et du béton." Ciments, bétons, plâtres, chaux **843**(2): 116-125.

Park, S. B., et coll. (2004). "Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate." Cement and Concrete Research **34**(12): 2181-2189.

Pfeuffer, M. et W. Kusterle (2001). "Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete." Cement and Concrete Research **31**(11): 1619-1625.

Polley, C., et coll. (1998). "Potential for using waste glass in Portland cement concrete." Journal of Materials in Civil Engineering **10**(4): 210-219.

Recyc-québec (2012). Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Recyc-québec.

Rehan, R. et M. Nehdi (2005). "Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry." Environmental Science & Policy **8**(2): 105-114.

S.B.Duffield & U, S. (2010). Economical mix design enhancements for FRS. Third International Conference on Engineering Developments in Shotcrete. E. S. Bernard. Sydney, Australia, CRC Press/Balkema: 85.

Saccani, A. et M. C. Bignozzi (2010). "ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete." Cement and Concrete Research **40**(4): 531-536.

Schneider, M., et coll. (2011). "Sustainable cement production—present and future." Cement and Concrete Research **41**(7): 642-650.

Schwarz, N., et coll. (2007). "Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes." Cement and Concrete Composites **29**(9): 656-666.

Shi, C. et K. Zheng (2007). "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete." Resources, Conservation and Recycling **52**(2): 234-247.

Topcu, I. B. et M. Canbaz (2004). "Properties of concrete containing waste glass." Cement and Concrete Research **34**(2): 267-274.

Treasury, H. M. s. (2006). "Stern review on the economics of climate change." London: HM Treasury **30**.

WBCSD (2012). "Get Numbers Right project Reporting CO2." Retrieved 27 octobre 2014, from <http://www.wbcscement.org/GNR-2012/index.html>.

WBCSD-CSI (2009). Getting The number Right, World Buisness Council for Sustainable Development.

WBCSD/IEA (2009). Cement roadmap, World Business Council for Sustainable Development.

Woolley, J. G. C. a. G. R. (1996). Properties of dry sprayed concrete containing ordinary portland cement or fly ash-portland cement. Srayed concrete technology for the 21st century. S. A. Austin. Edinburg, Chapman& Hall: 9.

Xu, J.-H., et coll. (2014). "CO2 emissions reduction potential in China's cement industry compared to IEA's Cement Technology Roadmap up to 2050." Applied Energy **130**(0): 592-602.

Annexe A

Fiches Techniques et signalétiques

A.1 Équipement de projection

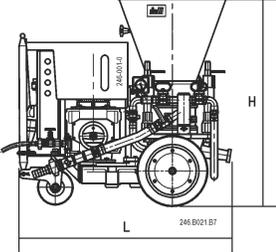
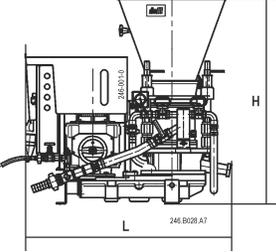
Technical data sheet
Edition 1, 2005
Aliva®-246

Aliva®-246

Concrete Spraying Machine

Description	The Aliva-246 is a sturdy concrete spraying machine for the dry spraying process.
Uses	Thanks to its variable output, the Aliva-246 can be used as well for small jobs, such as joint filling, as well for extensive slope consolidation work. The Aliva-246.5 is available in the following versions: <ul style="list-style-type: none"> ■ BASIC Electric drive, combined with BASIC-Dosing unit (not synchronized) ■ EXTENDED Electric drive, combined with EXTENDED-Dosing unit (not synchronized) ■ AIR With air drive, combined with BASIC-Dosing unit (not synchronized)

Technical data

Dimensions	With chassis	With pedestal
		
Length L		
BASIC / AIR	1130 mm	1130 mm
EXTENDED	1200 mm	1170 mm
Width	700 mm	700 mm
Height H		
with rotor 0,7 + 2,0 L	1110 mm	1020 mm
with rotor 3,6 L	1180 mm	1090 mm
with rotor 5,6 L	1260 mm	1170 mm
Weight		
BASIC / AIR	approx. 320 kg	approx. 315 kg
EXTENDED	approx. 450 kg	approx. 430 kg
Content of hopper	45 liters	45 liters



Drive	Electric (BASIC / EXTENDED)	With air motor (AIR)
Motor output	2,2 kW	Motor output 3 kW
Speed range		Speed range 700-1800 rpm
BASIC	1500 rpm	Pressure 3,5 bar
EXTENDED	700-1800 rpm	Air consumption 4 Nm ³ /min.
Voltages	400 V 50/60 Hz 440 V 60 Hz 220 V 50/60 Hz	
Protection	IP 55	

Theoretical conveying	Conveying (only dry)					
	Rotor L	Hose Ø mm	Conveying output *m ³ /h		max. grain mm	max. conveying distance (m) horizontal / vertical
		BASIC	EXTENDED+AIR			
	0,7	32	0,4	0,2-0,5	6	150/60 m**
	2,0	32 + 38	1,1	0,6-1,4	12	
	3,6	32 + 38	2,0	1,1-2,5	12	
	5,6	50	3,2	1,7-4,0	16	

* with theoretical filling degree of 100%, if motor with 60 Hz = 20% higher conveying capacity.
 ** more than 80 m conveying distance, use steel tubes.

Theoretical air consumption	Hose Ø mm	Air consumption Nm ³ /min. ***	
		Dry spraying	
		60 m	120 m
	32	3	4
	38	5	6
	50	8	10

*** Air consumption data are approximate values and are depending on conveying output, conveying distance and hose diameter.
 Caution:
 For the configuration AIR (with air motor) it has to be considered:
 Total air consumption = Air consumption for conveying + Air consumption for air motor!
 1 Nm³/min = 35 cfm

Safety instructions

Important safety regulations For detailed informations please consult the latest edition of the machine operating manual.

Drive	Electric (BASIC / EXTENDED)	With air motor (AIR)
Motor output	2,2 kW	Motor output 3 kW
Speed range		Speed range 700-1800 rpm
BASIC	1500 rpm	Pressure 3,5 bar
EXTENDED	700-1800 rpm	Air consumption 4 Nm ³ /min.
Voltages	400 V 50/60 Hz 440 V 60 Hz 220 V 50/60 Hz	
Protection	IP 55	

Theoretical conveying		Conveying (only dry)			
Rotor L	Hose Ø mm	Conveying output *m ³ /h		max. grain mm	max. conveying distance (m) horizontal / vertical
		BASIC	EXTENDED+AIR		
0,7	32	0,4	0,2-0,5	6	150/60 m**
2,0	32 + 38	1,1	0,6-1,4	12	
3,6	32 + 38	2,0	1,1-2,5	12	
5,6	50	3,2	1,7-4,0	16	

* with theoretical filling degree of 100%, if motor with 60 Hz = 20% higher conveying capacity.

** more than 80 m conveying distance, use steel tubes.

Theoretical air consumption	Hose Ø mm	Air consumption Nm ³ /min. ***	
		Dry spraying	
		60 m	120 m
	32	3	4
	38	5	6
	50	8	10

*** Air consumption data are approximate values and are depending on conveying output, conveying distance and hose diameter.

Caution:
For the configuration AIR (with air motor) it has to be considered:
Total air consumption = Air consumption for conveying + Air consumption for air motor!
1 Nm³/min = 35 cfm

Safety instructions

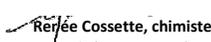
Important safety regulations	For detailed informations please consult the latest edition of the machine operating manual.
-------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------

A.2 Fumée de silice

A.2.1 Phase 1

		CERTIFICAT D'ANALYSE FUMÉE DE SILICE	
ASTM C1240-10a SPÉCIFICATIONS STANDARDS		Limites	Analyse de 2013
PHYSIQUE	Indice d'activité pouzzolanique, 7 jours *	> 105	133
	Surface Spécifique BET (m ² /g) *	> 15	24
	Densité (g/cm ³) *	-	2,24
	Finesse, retenu sur 45 µm (325 mesh) (%) *	< 10	6,9
CHIMIQUE	Perte au feu (PAF) (%) *	< 6.0	2,3
	Humidité (%) *	< 3.0	0,2
	Dioxyde de silicium (SiO ₂) (%) *	> 85	95,7
	Chlorure - soluble à l'acide (% par poids) *	-	0,13
	Alcalis disponibles (éq. Na ₂ O) (%) *	-	0,28
* Analyses faites par un laboratoire externe			
CSA A3001-08 - SPÉCIFICATIONS		Limites	Analyse de JUIL 2013
PHYSIQUE	Expansion à l'autoclave (%) *	< 0.2	-0,014
	Finesse, retenue sur 45 µm (325 mesh) (%)	< 10	2,41
	Tendance à capter l'air	Pas de bulles	Pas de bulles
CHIMIQUE	Perte au feu (PAF) (%)	< 10	3,76
	Dioxyde de silicium (SiO ₂) (%)	> 85	91,4
	Trioxyde de soufre (SO ₃) (%)	< 1.0	0,21
* Analyses faites par un laboratoire externe			
ANALYSE DE PRODUCTION		Analyse de JUIL 2013	
PHYSIQUE et CHIMIQUE	Carbone libre (C) (%)	2,83	
	Chlorure (Cl-) (%)	0,20	
	Densité Apparente (g/L)	249	
	Humidité (%)	0,60	
	Oxyde d'Aluminium (Al ₂ O ₃) (%)	0,42	
	Oxyde de Calcium (CaO) (%)	1,11	
	Oxyde de fer III (Fe ₂ O ₃) (%)	0,90	
	Oxyde de Magnésium (MgO) (%)	0,20	
	Pentoxyde de phosphore (P ₂ O ₅) (%)	0,09	
	Oxyde de Potassium (K ₂ O) (%)	0,42	
Oxyde de Sodium (Na ₂ O) (%)	0,19		
COMMENTAIRES :			
La fumée de silice rencontre les spécifications de "Silica Fume Used in Cementitious Mixtures of ASTM C1240-10a" et de "Cementing Materials and Blended Supplementary Cementing Materials of CSA A3001-08" pour le type SF.			
RAPPORT PRÉPARÉ PAR :		DATE :	VERSION :
Directeur - Laboratoire & Qualité		19 août 2013	1
SILICIUM QUÉBEC S.E.C. , 6500 Yvon-Trudeau, Bécancour, QC Canada G9H 2V8			

A.2.2 Fumée de silice Phase 2

		CERTIFICAT D'ANALYSE FUMÉE DE SILICE	
ASTM C1240-10a SPÉCIFICATIONS STANDARDS		Limites	Analyse de 2013
PHYSIQUE	Indice d'activité pouzzolanique, 7 jours	> 105	133
	Surface Spécifique BET (m ² /g) *	> 15	24
	Densité (g/cm ³) *	-	2.24
	Finesse, retenu sur 45 µm (325 mesh) (%) *	< 10	6.9
CHIMIQUE	Perte au feu (PAF) (%) *	< 6.0	2.3
	Humidité (%) *	< 3.0	0.2
	Dioxyde de silicium (SiO ₂) (%) *	> 85	95.7
	Chlorure - soluble à l'acide (% par poids)	-	0.13
	Alcalis disponibles (éq. Na ₂ O, %)	-	0.28
<small>* Analyses faites par un laboratoire externe</small>			
CSA A3001-08 - SPÉCIFICATIONS		Limites	Analyse de JANV 2014
PHYSIQUE	Expansion à l'autoclave (%) *	< 0.2	-0.032
	Finesse, retenu sur 45 µm (325 mesh) (%)	< 10	2.54
	Tendance à capter l'air	Pas de bulles	Pas de bulles
CHIMIQUE	Perte au feu (PAF) (%)	< 10	2.47
	Dioxyde de silicium (SiO ₂) (%)	> 85	94.3
	Trioxyde de soufre (SO ₃) (%)	< 1.0	0.23
<small>* Analyses faites par un laboratoire externe</small>			
ANALYSE DE PRODUCTION		Analyse de JANV 2014	
PHYSIQUE et CHIMIQUE	Carbone libre (C) (%)	2.00	
	Chlorure (Cl-) (%)	0.24	
	Densité Apparente (g/L)	217	
	Humidité (%)	0.59	
	Oxyde d'Aluminium (Al ₂ O ₃) (%)	0.24	
	Oxyde de Calcium (CaO) (%)	0.64	
	Oxyde de fer III (Fe ₂ O ₃) (%)	0.34	
	Oxyde de Magnésium (MgO) (%)	0.25	
	Pentoxyde de phosphore (P ₂ O ₅) (%)	0.11	
	Oxyde de Potassium (K ₂ O) (%)	0.60	
Oxyde de Sodium (Na ₂ O) (%)	0.22		
COMMENTAIRES :			
La fumée de silice rencontre les spécifications de "Silica Fume Used in Cementitious Mixtures of ASTM C1240-10a" et de "Cementing Materials and Blended Supplementary Cementing Materials of CSA A3001-08" pour le type SF.			
RAPPORT PRÉPARÉ PAR :		DATE :	VERSION :
 Renée Cossette, chimiste Directeur - Qualité, Concassage & Expédition		28 février 2014	1
<small>SILICIUM QUÉBEC S.E.C. , 6500 Yvon-Trudeau, Bécancour, QC Canada G9H 2V8</small>			

A.3 Ciment

A.3.1 Phase 1



CERTIFICAT D'ANALYSE

Ciment à usage général type

GU

Juillet 2013

Essais physiques

<u>Temps de prise Vicat (minutes)</u>	
Initial	110
Final	240
<u>Finesse</u>	
Blaine (m ² /kg)	386
Retenu 45 µm (%)	4
<u>Fausse prise (%)</u>	65
<u>Expansion</u>	
à l'autoclave (%)	0.11
Teneur en air (%)	8
<u>Résistance à la compression (MPa)</u>	
3 jours	24.8
7 jours	29.3
28 jours (Juin '13)	36.8
<u>Expansion des barres de mortier</u>	
à 14 jours (%)	0.011

Analyses chimiques (%)

SiO ₂	19.5
Al ₂ O ₃	4.7
Fe ₂ O ₃	3.4
CaO	60.7
CaO libre	1.5
MgO	2.6
SO ₃	3.8
Perte au feu	1.9
Insolubles	0.4
Alcalis (équivalent Na ₂ O)	0.91

Composition Minéralogique

C ₃ S	51.9
C ₂ S	16.8
C ₃ A	6.7
C ₄ AF	10.2

Par la présente, nous certifions que le ciment livré est conforme aux exigences de la norme CSA A3000-08 section A3001-08, type GU.

Pour tout renseignement concernant ce certificat d'analyse, veuillez contacter nos services techniques au (418) 329-2100, poste 3220.

GUCsaFr

Michel Chabot, ing.
Ingénieur chimiste





CERTIFICAT D'ANALYSE

Ciment à usage général type

GU

Janvier 2014

Essais physiques

Temps de prise Vicat (minutes)
Initial 100
Final 230

Finesse
Blaine (m²/kg) 376
Retenu 45 µm (%) 3

Fausse prise (%) 65

Expansion
à l'autoclave (%) 0.13
Teneur en air (%) 7

Résistance à la compression (MPa)
3 jours 26.1
7 jours 30.9
28 jours (Déc. '13) 38.6

Expansion des barres de mortier
à 14 jours (%) 0.013

Analyses chimiques (%)

SiO₂ 19.6
Al₂O₃ 4.6
Fe₂O₃ 2.9
CaO 60.6
CaO libre 1.8
MgO 2.6
SO₃ 3.7
Perte au feu 1.9
Insolubles 0.5
Alcalis (équivalent Na₂O) 0.88

Composition Minéralogique

C₃S 51.4
C₂S 17.5
C₃A 7.3
C₄AF 8.9

Par la présente, nous certifions que le ciment livré est conforme aux exigences de la norme CSA A3000-13 section A3001-13, type GU.

Pour tout renseignement concernant ce certificat d'analyse, veuillez contacter nos services techniques au (418) 329-2100, poste 3220.

GUCsaFr

Ingénieur chimiste



Poudre de Verre TRICENTRIS

IDENTIFICATION DU PRODUIT ET DE LA COMPAGNIE

Nom du produit	Poudre de Verre Tricentris
Fournisseur	Tricentris, centre de tri, 651 ch. Félix-Touchette, Lachute, Qc, J8H 2C5
Numéro de téléphone	(450) 562-4488
Utilisation	Ajout cimentaire

IDENTIFICATION DES DANGERS

Consignes d'urgences Poudre de verre (Silice amorphe). IRRITANT. Peut causer une irritation des yeux, de la peau et du système respiratoire.

Effets potentiels sur la santé

Voies d'exposition	Inhalation; contact avec la peau; contact oculaire; ingestion.
Inhalation	La silice amorphe n'est pas absorbée par la voie digestive et par la peau mais peuvent être inhalées. Les particules d'un diamètre de 5 à 30 µm se déposent surtout dans la région nasopharyngée tandis que celles d'un diamètre de 0,5 à 5 µm peuvent se déposer dans les régions trachéobronchique et alvéolaire. ⁱ L'évacuation pulmonaire des particules de silices amorphes dissoutes dans les fluides pulmonaires se fait rapidement par clairance.
Effets d'une exposition	Constitué principalement de silice amorphe sous une forme qui ne fait pas l'objet de réglementation, la poudre de verre n'est pas considérée comme la cause de problèmes de santé particuliers (CSST).

CARACTÉRISATION CHIMIQUE ET PHYSIQUE

Tableau 1-1 Caractérisation chimique et physique de la poudre de verre

Caractérisation chimique		
Composants	Poudre de verre	Unité
Bioxyde de silicium (SiO ₂)	74,07	%
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	1,97	%
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	0,44	%
Oxyde de calcium total (CaO)	13,56	%
Oxyde de magnésium (MgO)	1,26	%
Trioxyde de soufre (SO ₃)	0,20	%
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0,62	%
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	7,19	%
Chlore (Cl)	0,05	%
Bioxyde de titane (TiO ₂)	0,14	%
Pentoxyde de phosphore (P ₂ O ₅)	0,02	%
Oxyde de strontium (SrO)	0,00	%
Trioxyde de manganèse (Mn ₂ O ₃)	-0,03	%
Trioxyde de chrome (Cr ₂ O ₃)	0,03	%
Oxyde de zinc (ZnO)	0,00	%
Perte au feu	0,47	%
Alcalis équivalent (K ₂ O*0.658+Na ₂ O)	7,60	%
Caractérisation physique		
Densité	2,54	g/cm ³
Surface spécifique Blaine	382	m ² /kg
Couleur	blanche	-

MESURES DE PREMIERS SOINS

Inhalation	Arrêter l'exposition au produit et porter la victime dans un endroit aéré
Contact avec la peau	Laver avec du savon et de l'eau
Contact avec les yeux	Rincer les yeux contaminés à l'eau tiède pendant 15 à 20 minutes
Ingestion	Rincer la bouche avec de l'eau, ne pas faire vomir, consulter un médecin

DONNÉES TOXICOLOGIQUES

Silice amorphe	Numéro CAS : 7631-86-9, non toxique, ce produit n'est pas contrôlé selon les critères de classification du SIMDUT. La silice amorphe n'a pas d'effet fibrosant, mais elle peut provoquer une pneumoconiose de surcharge simple si l'exposition est importante. ⁱⁱⁱ
Cancérogénicité	N'est pas un cancérogène, IARC # CAS 007631-86-9, groupe 3 vol.68

DONNÉES ÉCOLOGIQUES

Aucun problème connu associé à la poudre de verre

INFORMATIONS SUR LE TRANSPORT

N'est pas régi par le Règlement canadien sur le transport de marchandises dangereuses
N'est pas régi par le Règlement DOT (États-Unis)

INFORMATIONS SUR LA RÉGLEMENTATION

Ce produit n'est pas contrôlé selon les critères de classification du SIMDUT

ⁱ <http://www.reptox.csst.qc.ca>

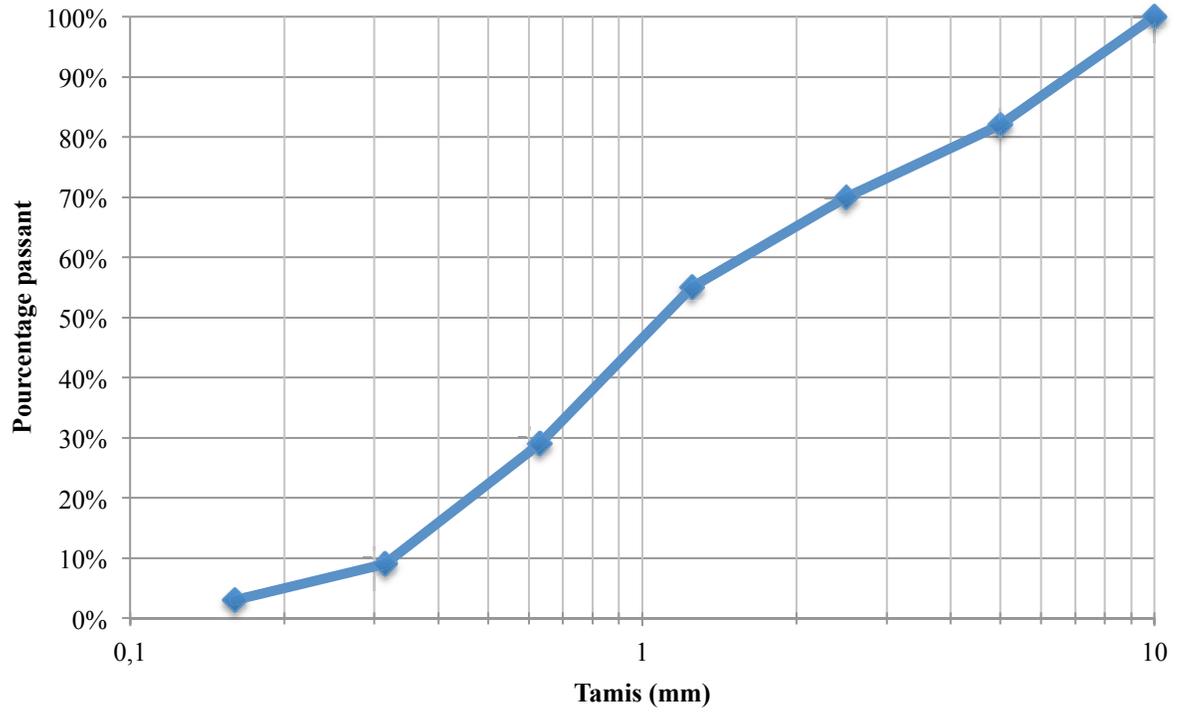
ⁱⁱ Règlement sur la santé et la sécurité du travail [S-2.1, r.19.01]. Québec : Éditeur officiel du Québec. (2007). [RJ-510071]

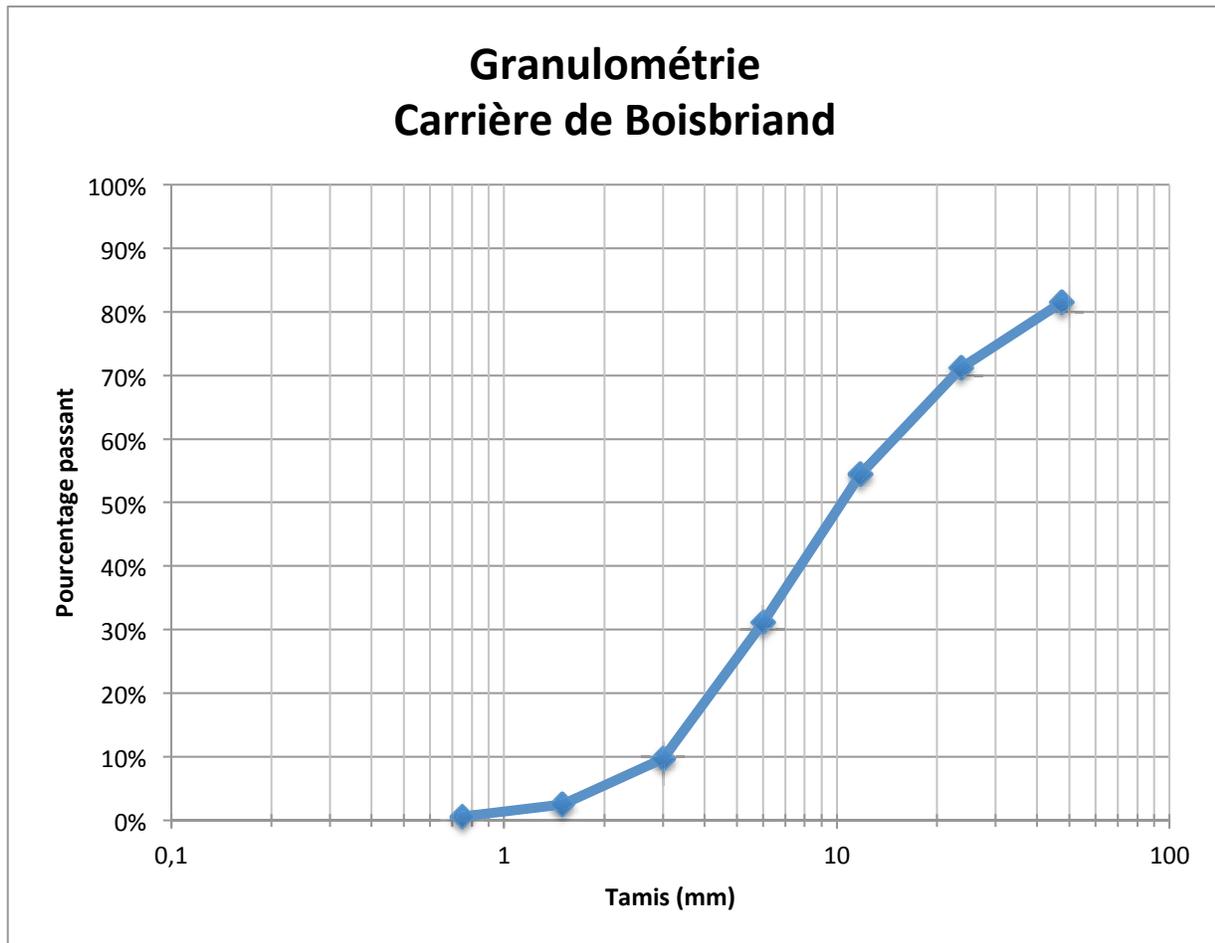
http://www.csst.qc.ca/lois_reglements_normes_politiques/acces_lois_reglements.htm

ⁱⁱⁱ <http://www.respir.com/doc/abonne/pathologie/silicose.asp>

Annexe B
Granulométries

Granulométrie Carrière de Surbury



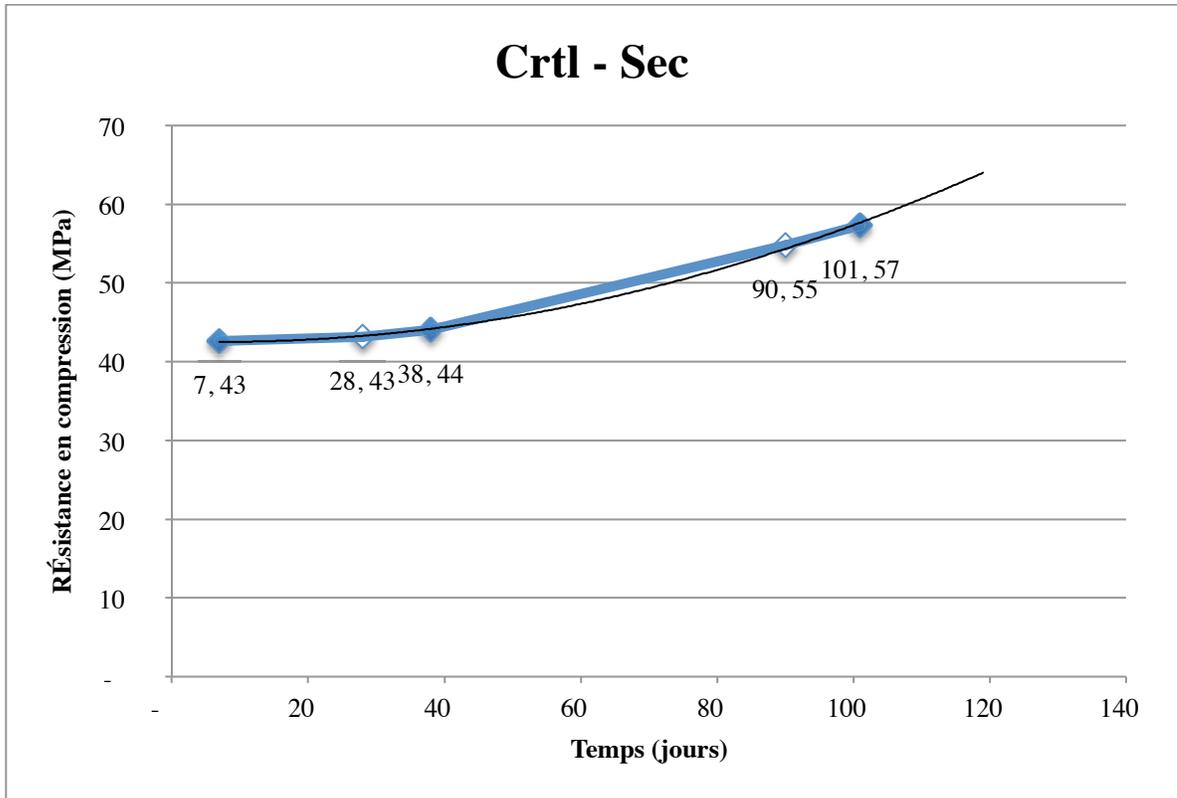


Annexe C

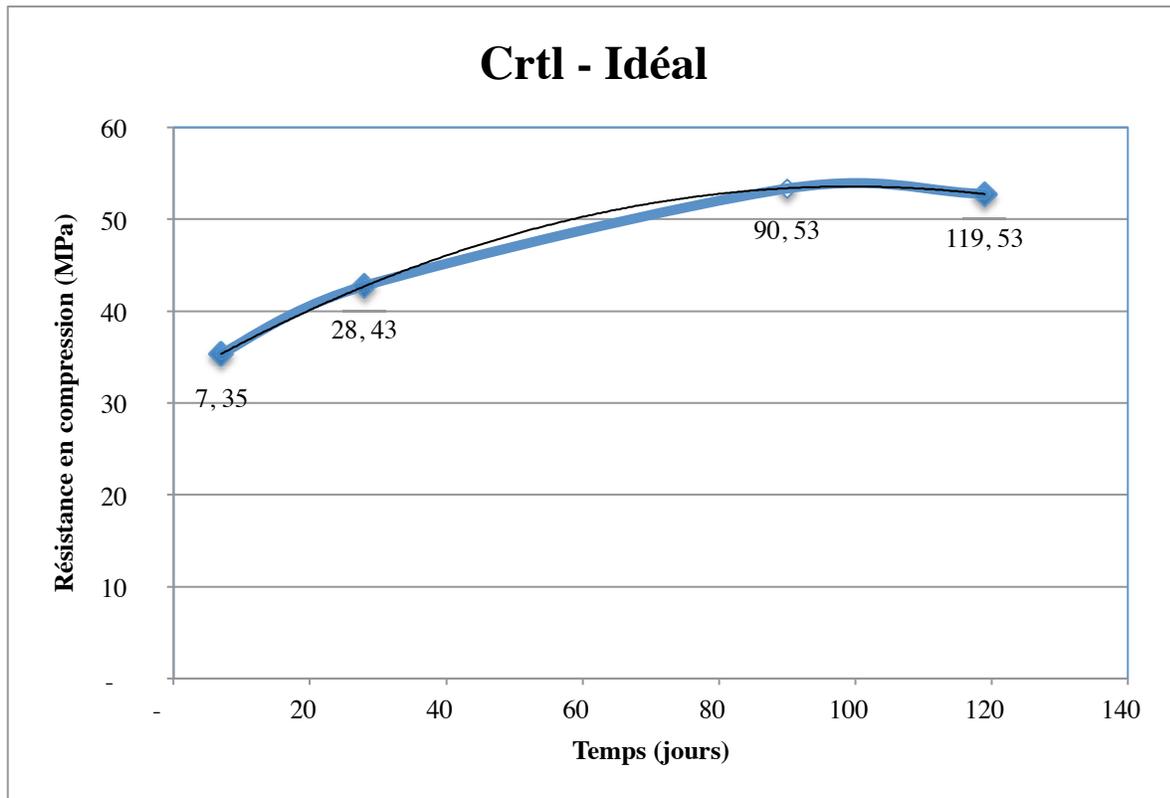
Résultats intermédiaires

C.1 Mélange Ctrl

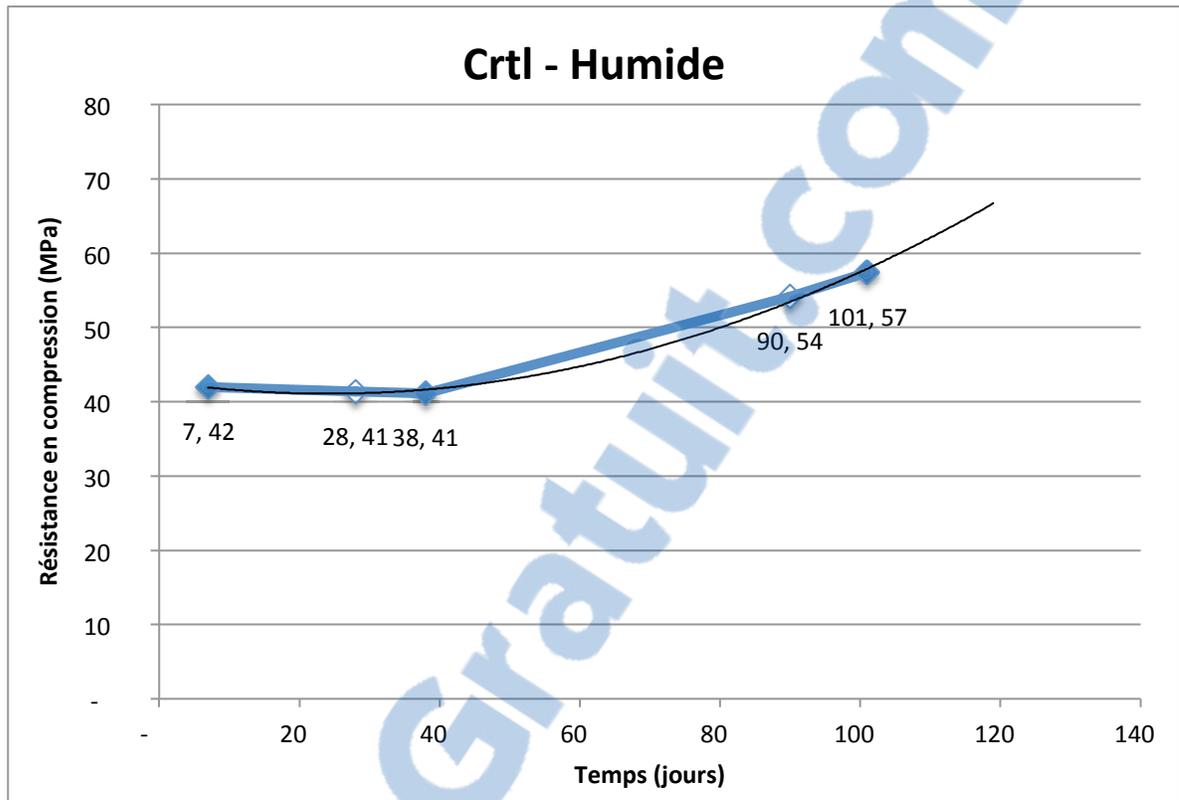
C.1.1 Ajustement sec



C.1.2 Ajustement idéal



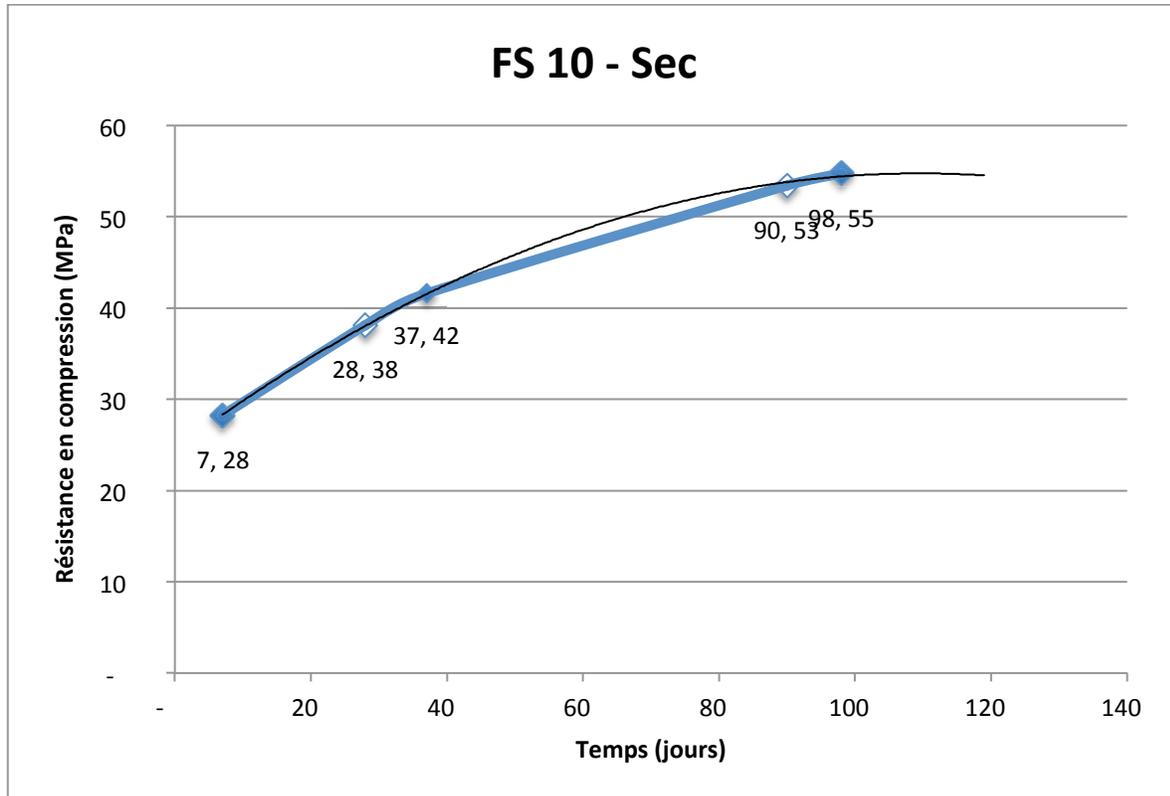
C.1.3 Ajustement humide



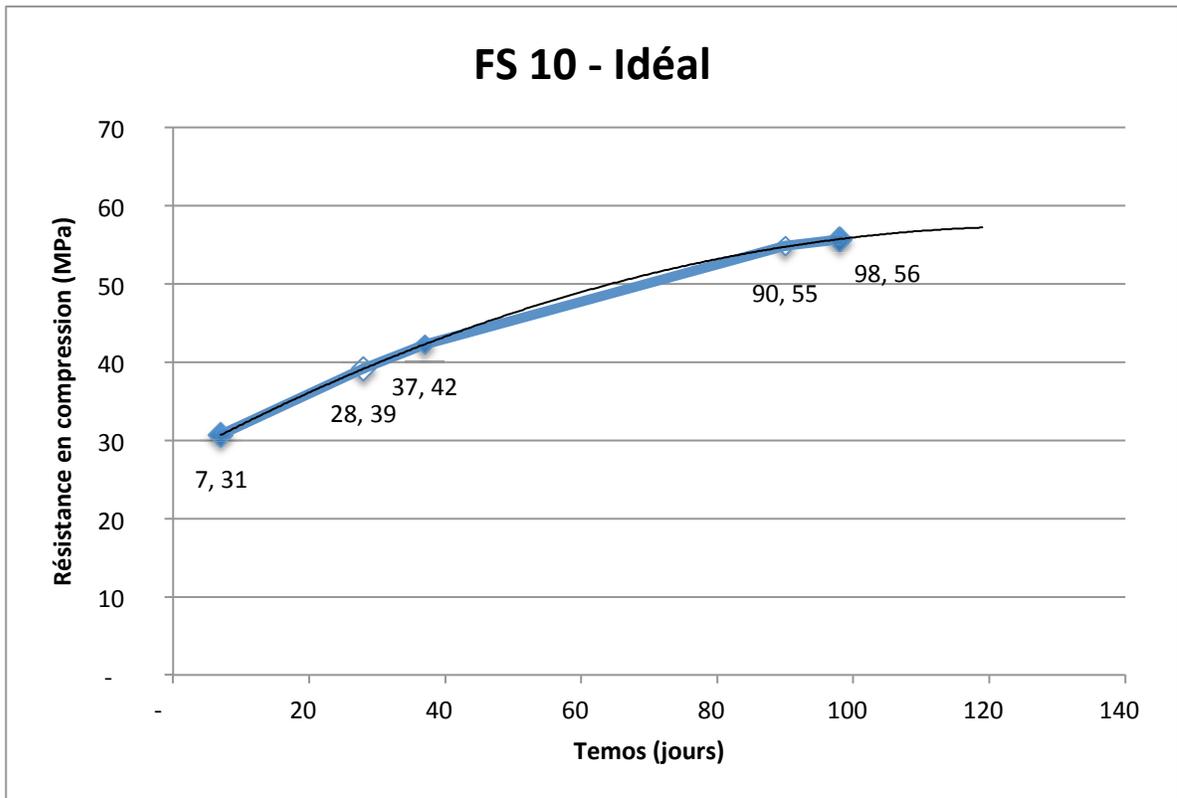
Rapport-Gratuit.com

C.2 FS10

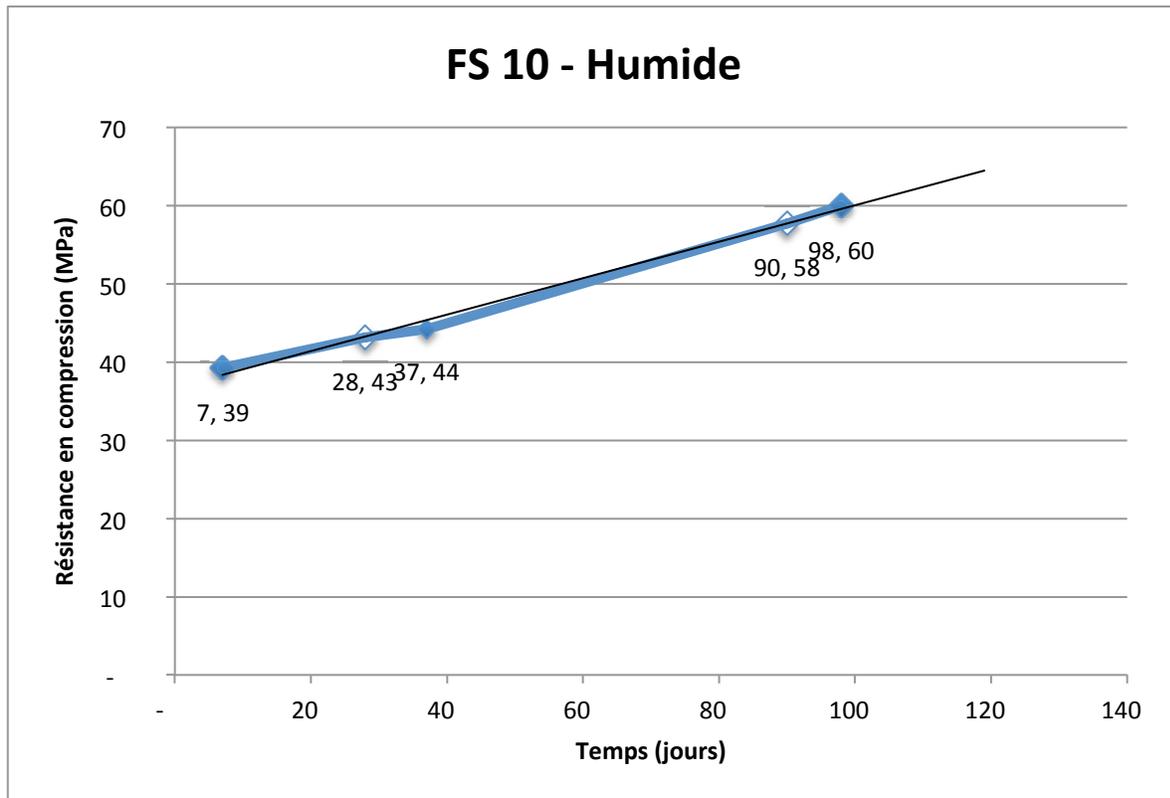
C.2.1 Ajustement sec



C.2.2 Ajustement idéal

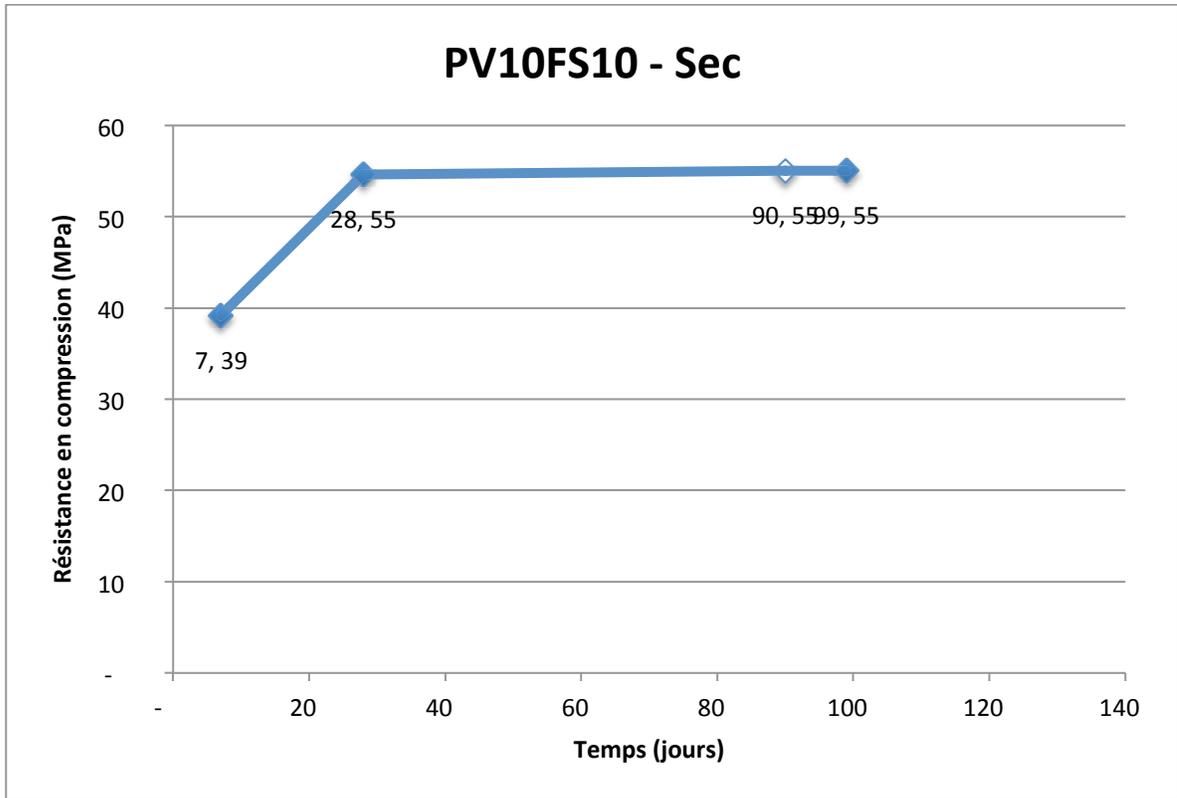


C.2.3 Ajustement humide

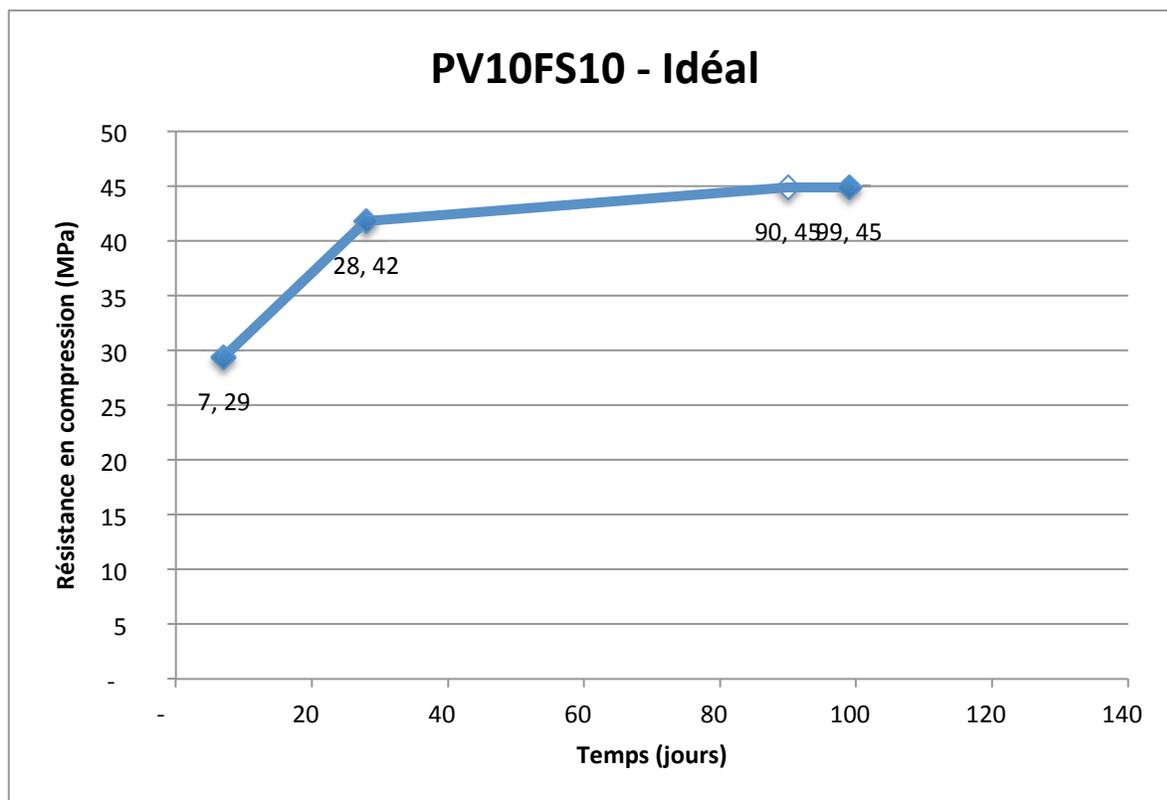


C.2.4 Mélange PV10FS10

C.2.4.1 Ajustement sec



C.2.4.2 Ajustement idéal



C.2.4.3 Ajustement humide

