

État des connaissances dans le béton projeté par voie humide

Dennis Burns, Marc Jolin, Frédéric Gagnon, Frédéric Chapdelaine

Département de génie civil
Université Laval
Québec (Québec)
Canada, G1K 7P4

Téléphone : 418-656-3797
Télécopieur : 418-656-3355
Courriel : dennis.burns@gci.ulaval.ca

Résumé :

Cet article présente l'état des connaissances actuelles dans le domaine du pompage, ainsi qu'une description des travaux de recherche en cours à l'Université Laval en béton projeté par voie humide. Les travaux visent l'identification des paramètres clés influençant la mobilité et la stabilité sous pression du béton frais (pompage). Les propriétés rhéologiques et tribologiques du matériau sont exploitées et insérées dans des modèles de prédiction de pression de pompage, tout comme le concept du coefficient de remplissage des cylindres. Afin d'approfondir les connaissances acquises dans le domaine du pompage, des travaux de recherche complémentaires sont entrepris au Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton de l'Université Laval (CRIB). L'objectif principal est de caractériser et améliorer le procédé de projection du béton par voie humide. Les travaux s'attardent d'abord à l'évaluation de l'influence du débit d'air à la lance sur le rebond et les caractéristiques de mise en place. Ils permettront également d'évaluer l'effet de l'utilisation de boyaux de moindre diamètre (moins de 50 mm) sur les pressions de pompage et les propriétés du béton durci. Finalement, le projet vise la quantification de l'évolution des propriétés rhéologiques et tribologiques dans le temps. En résumé, les travaux de recherche entrepris contribueront à améliorer les outils et connaissances à la disposition de l'industrie, afin d'améliorer la qualité des interventions en matière de béton projeté par voie humide.

Introduction

Le béton projeté par voie humide est une technique de mise en place du béton qui croît en popularité depuis plus d'une vingtaine d'années. En réponse à cette demande croissante et afin de demeurer compétitive, l'industrie du projeté se doit d'innover. Le procédé de projection par voie humide et le pompage du béton sont des processus complémentaires, tout avancement dans le domaine du pompage a inévitablement des répercussions positives sur le béton projeté par voie humide. Les défis de l'industrie se traduisent par l'établissement d'un compromis entre deux concepts: soit un béton assez maniable pour être pompé, mais suffisamment consistant pour tenir en place sans s'affaisser une fois projeté.

Cet article se veut, en premier lieu, une revue de l'état actuel des connaissances dans le domaine du pompage du béton, particulièrement en ce qui concerne le béton projeté par voie humide. En second lieu, l'article décrit le programme de recherche entrepris au *Centre de recherche sur les infrastructures en béton* de l'Université Laval (CRIB). Ces

travaux visent à générer des résultats expérimentaux qui contribueront à améliorer les outils et connaissances à la disposition de l'industrie du béton projeté par voie humide. Ce procédé sera donc caractérisé et amélioré en se basant sur l'évaluation de l'influence du débit d'air à la lance sur le rebond, sur l'influence de l'utilisation de boyaux de moindre diamètre (moins de 50 mm) sur les pressions de pompage et les propriétés du béton durci ainsi que sur l'évolution des propriétés rhéologiques et tribologiques dans le temps.

Pompage du béton

Le terme « pomper » du béton fait implicitement appel à la notion d'un béton pompable. Il s'avère que la « pompabilité », ou l'aptitude d'un béton à être pompé, ne constituent pas un concept simple et nécessite l'intervention de notions de stabilité et de mobilité. En règle générale, la pompabilité d'un béton frais est définie comme la capacité d'un béton en milieu confiné à se mobiliser sous pression tout en maintenant ses propriétés initiales (Gray, 1962; Beaupré, 1994). Les recherches effectuées au cours des dernières années dans le domaine du pompage du béton peuvent être classées en trois catégories distinctes, soit la stabilité du béton frais sous pression, la mobilité du béton frais confiné et l'optimisation du squelette granulaire et des constituants du mélange.

Stabilité sous pression

Un premier aspect lié au pompage du béton est la perte d'air dans le matériau après pompage. Cette perte d'air, variant de moins de un pourcent jusqu'à plus de cinq pourcent, peut être très néfaste si le réseau de bulles d'air est suffisamment modifié pour affecter la durabilité aux cycles de gel-dégel (Neville, 1995). Au début des années 1990, Dyer (1991) proposa l'hypothèse (figure 1) que la pressurisation favorise la dissolution des petites bulles d'air dans l'eau environnante. Lors de la dépressurisation, soit à la sortie du boyau, les bulles d'air dissoutes réapparaissent dans les bulles non dissoutes pour en former de plus grosses. De plus, Boulet (1997) démontra que le temps et l'amplitude de la pression exercée sur le béton frais ont une incidence sur le réseau de bulles d'air final. En effet, le nombre total de bulles d'air tend à diminuer et la taille moyenne de ces bulles croître, ce qui a comme effet d'augmenter la distance moyenne entre deux bulles d'air (facteur essentiel pour une bonne résistance aux cycles de gel dégel).

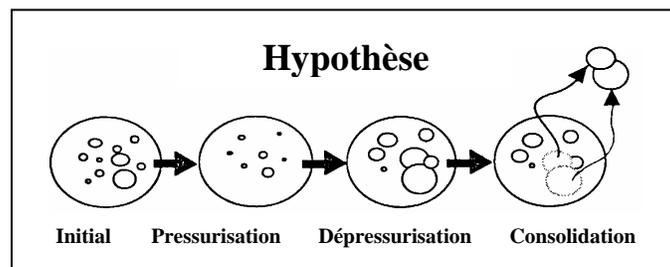


Figure 1: Hypothèse de la perte d'air lors du pompage (Dyer, 1991)

Un autre aspect qui, malheureusement, survient parfois lors du pompage est la ségrégation, soit la migration de l'eau ou de la pâte du mélange hors du squelette granulaire due à la pression exercée. Cette ségrégation ou ressuage forcé mènent habituellement à un blocage du matériau dans le boyau (Browne & Bamforth, 1977). Elle est souvent associée à des mélanges de béton à haut rapport eau/ciment ou à des mélanges qui possèdent une courbe granulométrique inadéquate (Powers, 1968). Plusieurs chercheurs ont proposés des essais pour quantifier le potentiel d'un mélange sous pression à résister au ressuage forcé en fonction de l'affaissement du béton frais. Browne & Bamforth (1977) ainsi que Kaplan (2000) ont mis au point des essais similaires pour mesurer la quantité d'eau extraite d'un mélange de béton frais sous pression en fonction de l'affaissement pour ainsi identifier une zone où le mélange est dit « pompable ». La principale différence entre les deux essais est que Kaplan (2000) exerce des pressions moindres, et par le fait même, plus près des pressions réellement engendrées dans un boyau lors du pompage. Kaplan (2000) établi également que des mélanges associés à des vitesses élevées de ressuage forcé tendent à causer des blocages lors du démarrage. Par conséquent, les mélanges présentant les vitesses de ressuage les plus faibles possible sont à favoriser.

Mobilité et friction

En essayant de quantifier la résistance exercée par le béton dans une conduite lors du pompage, Ede (1967) observa que l'écoulement d'un béton en conduite respecte les principes reliés à l'hydraulique. De plus, il démontra que la résistance à l'écoulement est, en règle générale, indépendante de la pression appliquée. La perte de charge engendrée dans une conduite droite est par conséquent linéaire.

Plusieurs chercheurs ont tenté d'identifier une corrélation entre la vitesse d'écoulement du béton frais dans une conduite et la friction engendrée en périphérie (Ede, 1967; Browne & Bamforth, 1977; Tattersall & Banfill, 1983; Kaplan, 2000; Chapdelaine, 2006). Il existe une panoplie de résultats à ce sujet, mais leur variabilité rend l'analyse difficile. Cette variation peut, en grande partie, être expliquée par le fait qu'une majorité des modèles néglige l'élément dynamique du béton en mouvement. Certains se sont attardés à cet aspect, se tournant vers des études rhéologiques et tribologiques. Le choix semble justifié puisque la rhéologie constitue l'étude d'un fluide en mouvement et la tribologie l'étude de l'interaction des surfaces en mouvement.

Il est aujourd'hui accepté, grâce à plusieurs recherches effectuées sur la rhéologie (Tattersall & Banfill, 1983; Tattersall, 1991; Bartos, 1992; Beaupré, 1994; Ferraris & de Larrard, 1998; Chapdelaine, 2006), que le béton frais respecte un modèle rhéologique Binghamien. Le seuil de cisaillement (τ_0) ainsi que la viscosité plastique (μ) (voir figure 2) du béton frais sont les deux propriétés qui décrivent l'ensemble du comportement du béton frais. En effet, pour mettre le béton frais en mouvement, un effort minimal équivalent au seuil de cisaillement doit être fourni. Une fois le mouvement amorcé, la force requise pour déformer le béton est directement proportionnelle au taux de cisaillement appliqué, taux relié à la viscosité plastique du matériau.

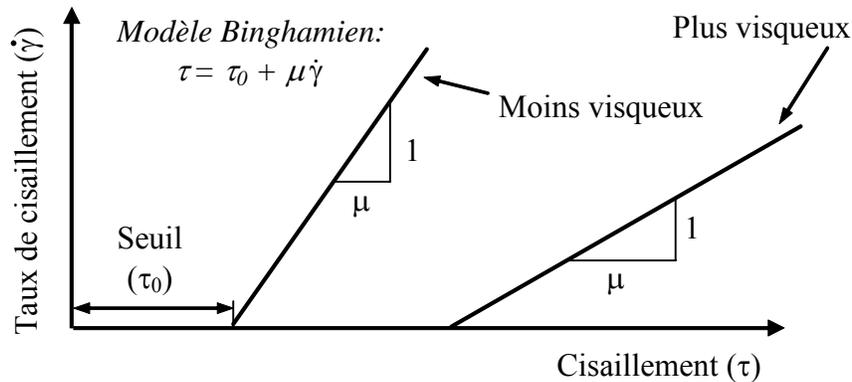


Figure 2: Représentation graphique du modèle Binghamien

L'utilisation d'un tel modèle permet d'inclure la composante de viscosité du béton, et non seulement le seuil de cisaillement obtenu à l'aide d'essais d'affaissement. Bref, la compréhension et l'exploitation du comportement Binghamien du béton frais sont essentielles pour bien caractériser les comportements d'écoulement des bétons actuels.

La tribologie n'a pas bénéficié d'autant d'efforts de recherche, probablement relié au fait que la tribologie concerne plus spécifiquement le domaine du pompage. C'est au tournant du siècle dernier que des chercheurs se sont attardés à l'utilisation du rhéomètre et du tribomètre pour la caractérisation du comportement du béton à l'état frais destiné au pompage (Kaplan, 2000; Chapdelaine, 2006). La figure 3 illustre un tribomètre utilisé par Chapdelaine (2006) dans ses travaux de doctorat.



Figure 3 : Photos du tribomètre : à gauche, vue générale avec tribomètre en caoutchouc et à droite, vue de près avec tribomètre en acier en mouvement

Kaplan (2000) utilisa les propriétés obtenues à l'aide d'un rhéomètre ainsi qu'un tribomètre pour développer un modèle bilinéaire qui établit les pressions requises lors du pompage (figure 4) en fonction du débit. Il est intéressant de noter que, d'après son modèle, pour de faibles vitesses de pompage, seules les propriétés de l'interface (tribologie) sont nécessaires pour décrire adéquatement le comportement du béton. Par contre, à des vitesses plus élevées, le modèle requiert les propriétés de l'interface et de viscosité plastique pour prédire les pressions de pompage. Ce concept implique qu'à de faibles vitesses de pompage, le béton se déplace en un seul morceau (plug flow) dans le

boyau, une mince couche de pâte lubrifiant les parois. Il s'agit de la limite d'initiation de l'écoulement associée au dépassement du seuil de cisaillement à l'interface par le taux de cisaillement appliqué. L'augmentation de la vitesse de pompage permet d'atteindre une valeur critique de la pression exercée sur la portion centrale du morceau pour induire un écoulement visqueux dans cette portion centrale.

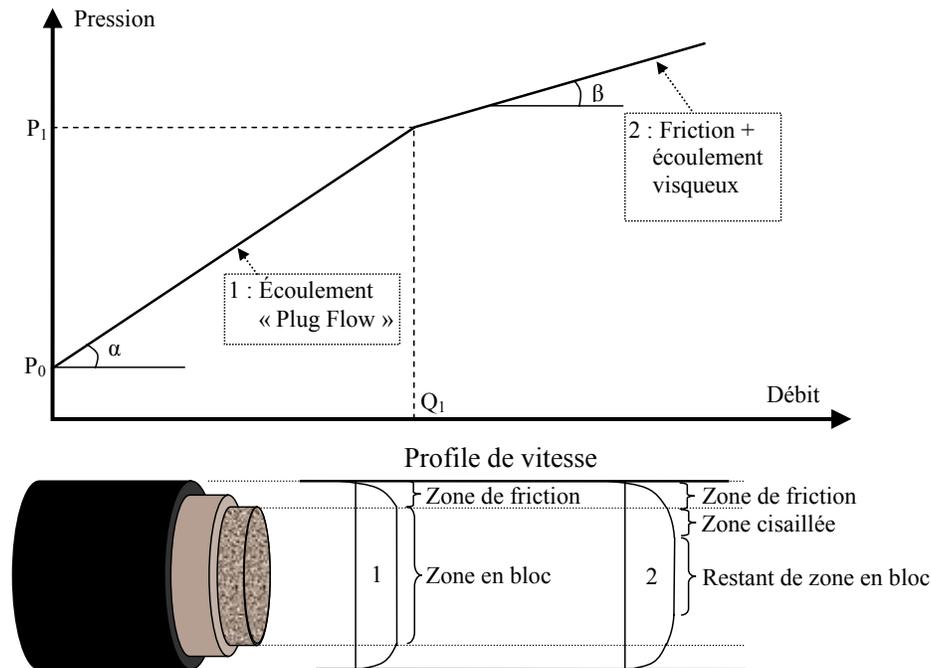


Figure 4 : Modèle de Kaplan (2000) et représentation schématique de l'écoulement dans le boyau pour les deux portions du modèle

Paramètres influençant le pompage

Plusieurs paramètres sont susceptibles d'influencer les pressions de pompage et ultimement, la capacité ou non de pomper un mélange. Les principaux facteurs investigués sont l'effet du volume de pâte, du rapport eau/ciment et ainsi que des réducteurs.

Effet du volume de pâte

Sans grande surprise, le volume de pâte est un aspect très important pour le pompage. Des études ont démontrées qu'un minimum de pâte, situé autour de 30 % en volume, doit être présent dans le mélange pour que celui-ci soit pompable (Chapdelaine & Beaupré, 2000). Ce contenu en pâte doit être suffisant pour enrober tous les granulats. Il a également été démontré qu'il y a diminution des pressions de pompage (pompage plus aisé) pour une augmentation du volume de pâte, à un rapport e/c constant (figure 5).

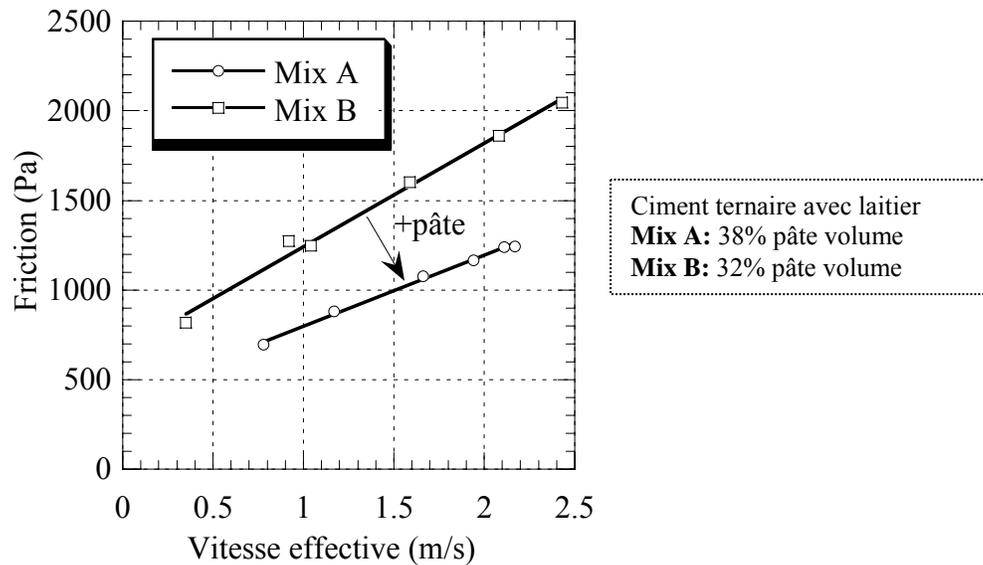


Figure 5 : Effet du volume de pâte sur les propriétés de pompage

Effet du E/L

Le rapport de eau/liant est, sans aucun doute, le facteur le plus influent sur les pressions de pompage. L'aptitude au pompage d'un béton croît lorsque le rapport eau/liant augmente (figure 6), concept souvent observé en chantier. Par contre, les bétons à trop haut rapport eau/liant sont plus sujet à la ségrégation, donc à un blocage dans le boyau, phénomène également constaté en chantier.

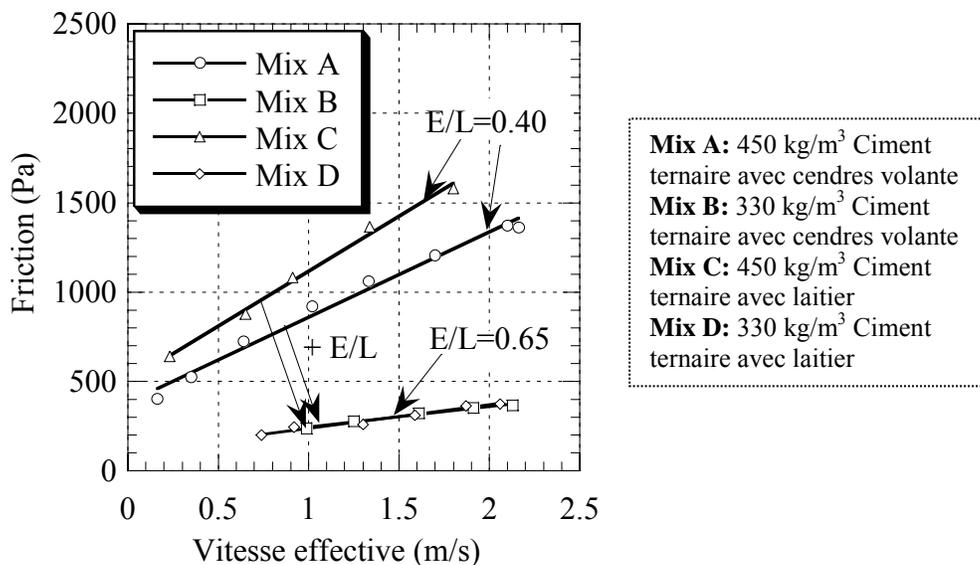
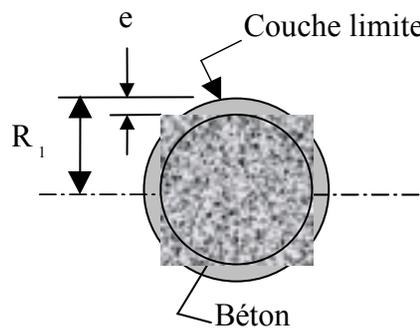


Figure 6 : Effet du rapport E/L sur les propriétés de pompage

Effet des réducteurs sur le pompage

En général, les blocages surviennent dans les éléments réducteurs habituellement situés à la sortie de la pompe. Deux phénomènes interviennent lors du passage du béton dans un réducteur, soit l'augmentation relative de pâte nécessaire pour maintenir la couche lubrifiante ainsi que l'augmentation de la vitesse du béton pour un débit constant.

Le premier phénomène, soit l'augmentation relative de la pâte nécessaire pour lubrifier l'intérieur du boyau, est bien illustré à la figure 7. Le périmètre de la section de béton illustrée est entouré d'une fine couche de pâte, soit celle correspondant à la zone en cisaillement (« friction ») de la figure 4, estimée d'épaisseur constante de 1 mm.



$$P = \frac{(R_1)^2 - (R_1 - e)^2}{(R_1)^2}$$

P: Quantité relative de pâte dans la couche limite
 R₁: Rayon du boyau
 e: Mince couche d'approximativement 1 mm

Figure 7 : Calcul de la quantité relative de pâte nécessaire pour former la couche lubrifiante

Cette information permet d'établir un graphique mettant en relation l'augmentation relative du volume de pâte en fonction du diamètre du boyau pour une couche constante de pâte lubrifiante de 1 mm. Il est intéressant de noter que, d'après le graphique de la figure 8, un boyau de 125 mm de diamètre requiert 3.2 % du volume totale de pâte pour assurer une couche lubrifiante de 1 mm et qu'un boyau de 50 mm de diamètre en requiert 7.8 %.

L'augmentation de la vitesse du béton dans un réducteur, soit le second phénomène impliqué lors du passage du béton dans un réducteur, est dû à la réduction du diamètre de la section pour un débit de béton constant. Il fut démontré précédemment que l'augmentation de la vitesse du béton exige une augmentation de la pression exercée par la pompe. La figure 8 montre la relation entre le diamètre d'un boyau et la vitesse du béton. Il est intéressant de constater qu'une diminution de moitié du diamètre d'un boyau fait quadrupler la vitesse dans le boyau.

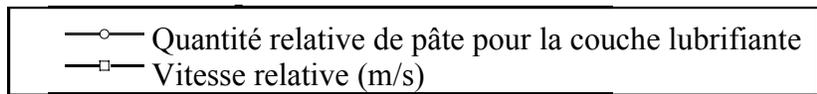
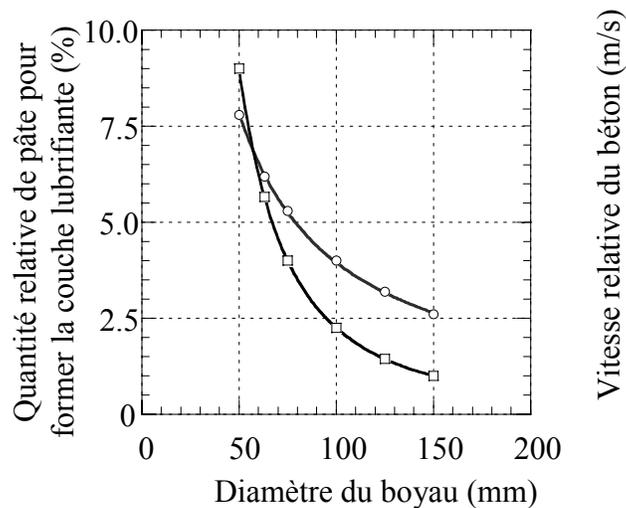


Figure 8 : Effet du diamètre du boyau sur la vitesse d'écoulement du béton et sur la quantité relative de pâte nécessaire pour former la couche lubrifiante

Ces deux phénomènes engendrent donc des effets très sévères sur le béton s'écoulant dans un réducteur. Pour prévenir les blocages associés à ces phénomènes, le mélange de béton doit posséder suffisamment de pâte pour produire la couche lubrifiante et cette pâte doit atteindre le périmètre du boyau suffisamment rapidement pour assurer la lubrification.

Modèle de prédiction de pompage

Au cours des dernières années, des chercheurs ont mis sur pieds des modèles de prédiction des pressions de pompage en fonction du débit d'écoulement du béton à l'aide de mesures rhéologiques et tribologiques (Kaplan, 2000; Chapdelaine, 2006). Le but de cet article n'étant pas de présenter ces modèles, il importe tout de même de souligner leur existence et les principaux obstacles auxquels les chercheurs ont fait face.

Un obstacle important que certain modèle néglige et que d'autres considèrent constant est le concept du coefficient de remplissage des cylindres. Dans ses recherches, Chapdelaine (2006) observe que le coefficient de remplissage des cylindres varie pour un mélange donné. Pour obtenir un modèle de prédiction de pompage le plus représentatif, les causes de ce phénomène se doivent d'être approfondies et mieux contrôlées.

Coefficient de remplissage des cylindres

Le coefficient de remplissage théorique des cylindre fut établi en fonction du temps effectif de pompage (le temps où le béton est réellement en mouvement), du temps moyen d'un coup de pompe et du temps que prend la valve pour se déplacer d'un

cylindre à l'autre. Ces valeurs peuvent toutes être obtenues en instrumentant un boyau avec des capteurs de pression. Pour valider ce concept, la masse de béton sortant du boyau a été pesée. Chapdelaine (2006) constata une bonne concordance avec les prédictions théoriques. Il a par ailleurs observé que le coefficient de remplissage (K_{cfc}) des cylindres ne variait pas seulement avec le type mélange, mais également avec le débit de la pompe. La figure 9 illustre un exemple de graphique de la relation entre le débit de la pompe et le coefficient de remplissage des cylindres. Il est intéressant de noter que Chapdelaine (2006) obtient des coefficients de remplissage des cylindres variant de 0.7 à 0.9.

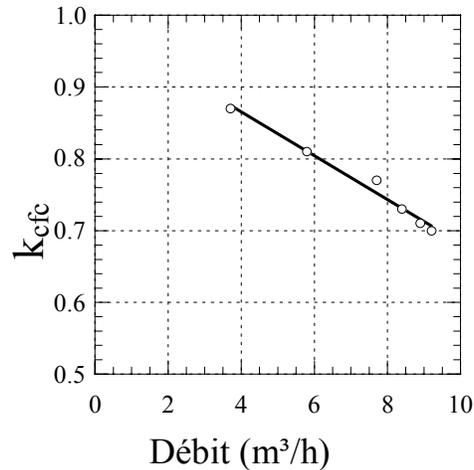


Figure 9 : Relation entre K_{cfc} et le débit à la pompe pour un mélange

Projet de recherche en béton projeté par voie humide

Le béton projeté par voie humide est un matériau de plus en plus populaire pour la réalisation de différents ouvrages du génie civil. Cette méthode de mise en place du béton s'améliore sans cesse et profite des plus récents développements dans le domaine du béton. Les travaux de recherche entrepris au *Centre de recherche sur les infrastructures en béton* de l'Université Laval visent à caractériser le béton projeté par voie humide en vue d'identifier des paramètres clés qui doivent être exploités afin d'améliorer le procédé.

Plus précisément, les paramètres évalués seront l'influence du débit d'air à la lance sur les propriétés du béton tel la composition en place, le contenu en air, la teneur en eau, la résistance à la compression et l'absorption. L'effet du débit d'air à la lance sera également évalué à l'égard de la quantité de rebond produit.

Les essais seront réalisés à l'aide d'équipements de taille réelle, conforme à ce qui est utilisés en chantier. Un des paramètres évalué sera l'influence de l'utilisation d'un boyau de petit diamètre sur les pressions de pompage simultanément aux paramètres mentionnés précédemment.

L'étude se penchera également sur l'effet de l'ajout de fibres synthétiques et d'acier dans les mélanges sur les propriétés du bétons frais et durci. Il est important de noter que les

dosages, autant en ciment qu'en adjuvant ou en fibre, sont étroitement reliés avec les valeurs utilisées en chantier, permettant ainsi un transfert aisé des résultats obtenus. Tous les essais seront réalisés avec des ciments type 10 et des ciments type 10 avec ajouts de fumé de silice.

En parallèle, l'évolution des propriétés rhéologiques et tribologiques du béton dans le temps sera quantifiée. Ces résultats seront d'une aide précieuse pour continuer à améliorer les modèles de prédiction des pressions de pompage à l'aide des propriétés rhéologique et tribologique. Ces résultats pourraient également permettre de développer une méthode d'exploitation de la thixotropie d'un béton afin d'augmenter les épaisseurs de projection sans avoir recours à des accélérateurs de prises.

Dans le but de confirmer l'hypothèse de Dyer (1991) voulant que l'air dans le béton sous pression dans un boyau tende à se dissoudre, des essais de béton sous pression seront réalisés. Des bétons frais seront soumis et maintenus à des pressions semblables à celles encourues lors des pompages jusqu'à la prise finale du béton. Des observations au microscope seront effectuées afin de caractériser le réseau de bulle d'air.

Conclusions

Le pompage du béton s'avère être une méthode de transport du béton en constante évolution dans le monde entier. Dans la dernière décennie, la popularité croissante du béton projeté par voie humide ainsi que la sévérité croissante des devis à l'égard des performances des bétons a propulsé le pompage du béton à un niveau supérieur. Comme démontré précédemment, certains aspects de la pompabilité du béton nécessite davantage d'attention. Les auteurs espère que les travaux de recherche entrepris au *Centre de recherche sur les infrastructures en béton* de l'Université Laval (CRIB) contribueront à améliorer les outils et connaissances à la disposition de l'industrie, afin d'améliorer la qualité des interventions en matière de béton projeté par voie humide.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur participation financière par le biais de la Chaire industrielle sur le béton projeté et les réparations en béton. Les membres de cette chaire sont : le ministère des Transports du Québec, la Ville de Québec, la Ville de Montréal, Master Builders Technologies Ltd, King Package Materials and Co., Ciment St-Laurent Inc., Lafarge Canada Inc., Rhodia, Grace et Hydro-Québec. Il est également important de souligner la participation de Adjuvant Euclid Canada Inc., Pompage Industriel du Québec Inc., ainsi que Allentown Equipment.

Références

Bartos, P. (1992). *Fresh Concrete Properties and Tests*. Elsevier, N.Y., 292 pages.

Beaupré, D. (1994). Rheology of High Performance Shotcrete. Civil Engineering Department, University of British Columbia, Canada. Ph.D. Thesis, 250 pages.

Boulet, D. (1997). Influence du pompage sur les caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton. Département de génie civil, Université Laval, Canada. Mémoire, 200 pages.

Browne, R.D., Bamforth, P.B. (1977). Tests to Establish Concrete Pumpability. ACI Journal, Vol. 74, No. 5, May, pp. 193-207.

Chapdelaine, F., Beaupré, D. (2002), Le volume de pâte de liant : une condition nécessaire au pompage du béton, Progrès dans le domaine du béton 2002, ACI Section du Québec et de l'est de l'Ontario, Ottawa, 3-4 décembre 2002.

Chapdelaine, F. (2006). Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton. Département de génie civil, Université Laval, Canada. Thèse, 200 pages.

Dyer, R. M. (1991). An Investigation of Concrete Pumping Pressure and the Effects of Pressure on the Air-Void System of Concrete. Master Thesis, University of Washington, 223 pages.

Ede, A.N. (1967), The resistance of concrete pumped through pipelines, Magazine of Concrete research, vol 9, no. 27, nov, 1967, pp. 129-140

Ferraris, C., De Larrard, F. (1998), Testing and modelling of fresh concrete rheology, National Institute of Standards and Technology, NISTR 6094, Gaithersburg, MD, February, 61 p.

Gray, J. (1962) Laboratory procedure for comparing pumpability of concrete mixtures, presented at the sixty-fifth annual meeting of the society, National Crushed Stone Assn., Washington, D.C., June 24-29, pp. 964-971

Kaplan, D. (2000) Pompage des bétons, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 225 p.

Neville, A.M. Properties of Concrete. Pearson Education Ltd., Singapore, 1995

Powers, T.C. (1968) The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons inc., New York, 664 p.

Tattersall, G.H. & Banfill, P.F.G. (1983) The Rheology of Fresh Concrete, London, Pitman, 1983, 356 p.

Tattersall, G.H. (1991) Workability and Quality Control of Concrete, London, E & FN SPON, 1991, 262 p.