

FRÉDÉRIC CHAPDELAINÉ

# **ÉTUDE FONDAMENTALE ET PRATIQUE SUR LE POMPAGE DU BÉTON**

Thèse présentée  
à la Faculté des études supérieures  
de l'Université Laval  
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

Doctorat en génie civil  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC, CANADA

JANVIER, 2007

© Frédéric Chapdelaine, 2007

## Résumé

Le pompage du béton est une technique de mise en place du béton frais utilisée depuis plusieurs années. Le béton est déposé dans une pompe à béton qui achemine le béton dans des boyaux, souples en caoutchouc ou rigides en acier, directement à l'endroit désiré. Peu de chercheurs se sont intéressés aux problèmes de pompage du béton, probablement à cause de la complexité de mener une campagne de recherche sur ce sujet. La pompabilité est définie généralement comme la mobilité et la stabilité sous pression d'un béton. Cette thèse s'intéresse surtout aux problèmes de mobilité sous pression.

Le but de cette thèse est de développer un modèle prédictif de l'aptitude au pompage du béton. Le modèle prend en compte le type de boyau, les coudes, les réducteurs et l'effet de la hauteur. Pour valider le modèle, plusieurs mélanges de béton ont été fabriqués et pompés dans un circuit comprenant un réducteur pour passer d'un diamètre de 100 mm à 50 mm et d'un boyau en caoutchouc de 15,24m de longueur et de 50 mm de diamètre instrumentés de capteurs de pression servant à mesurer les pertes de charge. Quatre types de liant commercialement disponibles (type 10, type 10 avec fumée de silice, ternaire avec cendres volantes et ternaire avec laitiers de hauts fourneaux) ont été utilisés pour fabriquer des mélanges de béton de rapports eau-liant et volume de pâte différents. Pour valider le modèle sur des boyaux d'acier et étudier l'effet de la hauteur et des coudes sur les pressions de pompage, un camion pompe muni d'une flèche a été instrumenté de capteurs de pression. Vingt chantiers ont été visités sur lesquels les mesures ont été réalisées.

Deux tribomètres à béton ont été développés, l'un à surface d'acier, l'autre à surface en caoutchouc, pour mesurer les propriétés d'interface du béton frais. Les résultats ont montré que le tribomètre mesure des propriétés d'interface représentatives des propriétés de pompage.

Les résultats obtenus montrent que pour un squelette granulaire donné, peu importe le type de liant, il existe un volume de pâte de liant minimal pour que le béton soit apte au pompage. Lorsqu'un liant ternaire est utilisé pour fabriquer un mélange de béton, ce dernier

est plus facilement pompable qu'un mélange de béton fabriqué avec une masse comparable de ciment type 10. La densité plus faible des liants ternaires semble être responsable de l'effet bénéfique. Pour une même masse de liant, le volume est plus élevé. Aussi, pour un liant moins dense, il est possible de fabriquer un mélange de béton contenant moins de liant en terme massique et qu'il soit toujours apte au pompage. Les mélanges de béton à haut rapport E/L sont quant à eux beaucoup plus facile à pomper (pressions faibles). Par contre, pour ces mélanges, lors de la mesure des pressions de pompage, un pic caractéristique est observé au début des plateaux. La pâte contenue entre les granulats pour ces mélanges est de très faible viscosité et une friction supplémentaire est à vaincre avant que le béton ne s'écoule due au frottement entre les granulats.

## Avant-Propos

J'aimerais en premier lieu remercier mon directeur de thèse M. Denis Beaupré, du département de génie civil de l'université Laval. Denis a toujours cru au projet et surtout, il a cru en moi et m'a donné son entière confiance dans la réalisation des mes essais. Il a mis à ma disposition tous les moyens possibles pour mettre à terme cette thèse. Denis a su, entre autre, m'encourager pendant une période difficile de ma thèse.

Je remercie mon co-directeur de thèse M. Kamal Khayat du département de génie civil de l'université de Sherbrooke. M.Khayat est un professeur minutieux et très professionnel. Ses conseils judicieux, questions et commentaires ont toujours été très appréciés et formateurs.

J'aimerais remercier sincèrement les membres du jury de ma soutenance et correcteurs de ma thèse. Votre réputation et votre sérieux apportent beaucoup de valeur à ce travail. Je remercie donc, M. Thiery Sedran (LCPC, France), M. Marc Jolin (Université Laval), M. Richard Pleau (pré-lecteur, école d'architecture, Université Laval), M.Kamal Khayat (co-directeur) et M.Denis Beaupré (directeur).

Ce travail s'est déroulé sous la participation financière de compagnies et d'organismes gouvernementaux. J'aimerais remercier le FCAR pour la « bourse en milieu pratique » qui m'a été octroyée avec la participation de Pompage Industriel (M.François Michel) et de l'Association des Propriétaires de Pompes à béton du Québec (M.Félix Fleury). Je remercie le CRSNG pour la subvention de recherche et développement coopératif (RDC) avec la participation de Lafarge Canada (M.Yves Lapalme), Ciment St-Laurent (M. Jean-Claude Leduc et Mme Sonya Gagnon) et Euclid (M. Michel Lessard). Au travers des conversations avec ces différentes personnes, la problématique du projet de recherche a été définie et surtout, j'ai eu grand plaisir à apprendre de leurs expériences sur le milieu pratique de la production du béton et du pompage. Sans la participation active du milieu pratique dans la recherche, beaucoup de projets de recherche ne pourraient être mis à terme.

Sans l'aide de Pierre-Luc Bédard, la campagne réalisée en laboratoire n'aurait jamais été aussi plaisante. Malgré les tonnes de matériaux à transporter, Pierre-Luc a toujours été de bonne humeur et a été un très fidèle compagnon de travail. Je remercie aussi Cindy Hallé

pour son aide pendant la campagne d'essais en chantier. Malgré un horaire plutôt matinal, elle a été toujours été ponctuelle, minutieuse et souriante. Merci à Réjean pour sa précieuse collaboration et pour ses connaissances très pratiques du pompage. Un merci spécial à deux stagiaires, Nicolas et Ludovik, qui m'ont tellement posé de questions que j'ai finalement appris de mes réponses. Ils ont été d'une aide précieuse pour la réalisation de plusieurs essais.

Je remercie toute l'équipe du CRIB, professeurs, professionnels, attachés de recherche, étudiants, stagiaires. Tous et chacun ont contribué à un part de réussite de ce projet à un moment ou à un autre. Surtout, vous avez été mon milieu de travail depuis plusieurs années.

De façon très personnelle, je remercie Chantal, ma conjointe, qui m'a épaulé sans condition pendant tout ce projet. Merci à notre petit Nicolas qui m'a fait des sourires à tous les soirs en rentrant à la maison. Vous m'avez donné un support inconditionnel pendant les longues soirées de rédaction et les hauts et les bas de cette grande aventure. Je remercie mes parents, André et Raymonde, qui ont toujours été très fiers des accomplissements et réussites de leurs enfants. Je remercie mes deux frères, Jérôme et Sébastien qui sont mes deux grands complices dans la vie de tous les jours. Sans vous tous, il m'aurait été très difficile de trouver le courage de passer au travers un certain épisode et mettre à terme ce projet.

*À mes enfants*

# Table des matières

Introduction générale .....	14
Chapitre 1 Revue de la documentation .....	16
1.1 Mise en contexte .....	17
1.2 Types de pompes à béton et équipement .....	18
1.3 Prévision de la pression nécessaire au pompage .....	20
1.4 Études portant sur le pompage du béton .....	21
1.4.1 Études portant sur la stabilité sous pression .....	22
1.4.2 Études portant sur la mobilité et la friction.....	26
1.4.3 Études portant sur les coudes et les réducteurs.....	31
1.4.4 Facteurs affectant la pompabilité .....	34
1.5 Rhéologie et tribologie.....	43
1.5.1 Essais rhéologiques sur béton frais .....	43
1.5.2 Essais tribologiques pour béton frais .....	47
1.6 Conclusion et besoins en recherche .....	50
Chapitre 2 Développement des tribomètres.....	52
2.1 Cahier des charges et configuration retenue .....	53
2.2 Hypothèses de base.....	54
2.3 Protocole d'essai tribologique .....	56
2.4 Calcul des contraintes sur les parois du tribomètre .....	58
2.5 Différence entre les mesures réalisées au tribomètre à paroi en acier et celui à paroi en caoutchouc .....	61
Chapitre 3 Description des circuits de pompage et de l'instrumentation .....	62
3.1 Essais normalisés réalisés sur le béton .....	63
3.2 Fabrication du béton .....	63
3.3 Essai rhéologique.....	64
3.4 Essais tribologiques .....	65
3.5 Installation de pompage en laboratoire.....	66
3.5.1 Description de la pompe à béton.....	66

3.5.2	Description du circuit de pompage en laboratoire .....	67
3.5.3	Description de l'installation des capteurs de pression .....	68
3.5.4	Étalonnage des capteurs de pression utilisés en laboratoire .....	68
3.6	Installation de pompage en chantier .....	70
3.6.1	Description de la pompe à béton de chantier .....	70
3.6.2	Position des capteurs de pression.....	71
3.6.3	Installation des capteurs de pression.....	73
3.6.4	Étalonnage des capteurs de pression.....	73
3.7	Formes typiques d'une courbe de pression mesurée .....	74
3.8	Prédiction du coefficient de remplissage à partir de la courbe de pression de pompage.....	77
Chapitre 4 Essais sur bétons .....		80
4.1	Présentation des mélanges de béton.....	81
4.2	Effet du volume de pâte .....	82
4.3	Effet du type de liant.....	83
4.4	Effet du rapport E/L.....	85
4.5	Réel gain avec les liants ternaires .....	89
4.6	Effet de l'air entraîné .....	89
Chapitre 5 Analyse des résultats.....		93
5.1	Prédiction de la courbe pression débit pour le circuit de laboratoire.....	94
5.2	Prise en compte des réducteurs et des coudes.....	97
5.2.1	Problématique des réducteurs .....	97
5.2.2	Mesure des pertes de charge dans les réducteurs.....	100
5.2.3	Mesure des pertes de charge dans les coudes .....	101
5.3	Prise en compte de l'effet de la hauteur.....	103
5.3.1	Analyse de l'effet de la hauteur pour la flèche complète .....	104
5.3.2	Prédiction de la pression pour une section droite soumise à l'effet de la hauteur	105
5.4	Prédiction de la courbe pression débit pour le circuit de chantier .....	108
5.5	Relation entre les paramètres rhéologiques et les paramètres tribologiques .....	111
5.6	Relation entre le coefficient de remplissage et les propriétés rhéologiques .....	113



Conclusion	117
Bibliographie .....	121
Annexe A Courbes tribologiques et rhéologiques .....	127
Annexe B Formulations et propriétés des mélanges de béton pour la campagne exploratoire	129
Annexe C Fiche technique de la pompe de laboratoire .....	130
Annexe D Fiche technique des capteurs de pression .....	131
Annexe E Fiche technique de la pompe de chantier.....	133
Annexe F Formulations et propriétés des mélanges de béton pour la campagne de pompage en laboratoire.....	135
Annexe G Propriétés rhéologiques, tribologiques et de pompages des mélanges de la campagnes de laboratoire.....	136
Annexe H Mesures des pressions et vitesses pour la campagne de laboratoire.....	137
Annexe I Courbes pressions-débit pour la campagne de laboratoire .....	138
Annexe J Données recueillies pour l'analyse du réducteur .....	140
Annexe K Données recueillies pour l'analyse des coudes.....	141
Annexe L Données recueillies pour l'analyse d'une section droite d'acier en tenant compte de l'effet de la hauteur .....	142
Annexe M Données recueillies pour l'analyse de l'effet de la hauteur .....	143
Annexe N Données recueillies et calculs pour la prédiction de la pression pour la flèche complète du camion-pompe.....	144
Annexe O Position de la flèche pour chacun des chantiers .....	145

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Principaux chercheurs ayant travaillé sur la friction.....	27
Tableau 1.2 : Contenu minimal en particules fines suggéré en fonction du diamètre maximal des granulats dans le mélange de béton (Guide Schwing).....	41
Tableau 1.3 : Constantes de conversions des unités rhéologiques du rhéomètre IBB en unités fondamentales BT-RHEOM.....	47
Tableau 3.1 : Essais réalisés sur les bétons.....	63
Tableau 3.2 : Propriétés spécifiées par le fabricant de la pompe à béton utilisée en laboratoire .....	67
Tableau 3.3 : Constantes d'étalonnage des capteurs utilisés sur le circuit de laboratoire.....	70
Tableau 3.4 : Propriétés de la pompe à béton utilisée en chantier.....	71
Tableau 3.5 : Constantes d'étalonnage des capteurs utilisés sur la flèche du camion-pompe .....	74
Tableau 4.1 : Formulations des mélanges de béton.....	81
Tableau 4.2 : Propriétés des mélanges de béton avec air entraîné.....	90
Tableau 4.3 : Exemple de composition de mélange de béton avec et sans air .....	92

## Liste des figures

Figure 1.1 : a) Une des premières pompes à béton Schwing (Guide Schwing); b) Mécanisme des premières pompes à béton. ....	18
Figure 1.2 : Mécanisme d'une pompe hydraulique à deux pistons (Schwing) .....	19
Figure 1.3 : Mécanisme d'une pompe péristaltique (Neville et Brooks, 1990).....	20
Figure 1.4 : Abaque typique servant à prédire les pressions de pompage par la mesure de l'affaissement basée sur des essais pratiques.....	21
Figure 1.5 : Classification des types de recherche sur le béton frais selon Roy (1982) .....	21
Figure 1.6 : Hypothèse sur la perte d'air lors du pompage (Dyer, 1991).....	23
Figure 1.7 : a) Appareil pour réaliser l'essai de ressuage forcé; b) Diagramme permettant de prédire la pompabilité. ....	24
Figure 1.8 : a) Essai de ressuage développé par Kaplan (2000); b) Interprétation des résultats .....	25
Figure 1.9 : Écoulement en bloc .....	27
Figure 1.10 : Résultats de différents auteurs sur la friction (Browne and Bamforthe, 1977) .....	28
Figure 1.11 : a) Modèle de prédiction de la friction par Chouinard (1998); b) Modèle de prédiction de la pression de pompage par Kaplan (2000). ....	29
Figure 1.12 : Équilibre des forces sur un coude (Morinaga, 1973) .....	32
Figure 1.13 : Équilibre des forces sur un réducteur (Morinaga, 1973).....	33
Figure 1.14 : Granulométrie complète souhaitée pour une dimension maximale des granulats de 19 mm selon ACI, Ragan et Schwing (16mm) (figure adaptée). ....	36
Figure 1.15 : Résultats des essais sur l'effet des vides inter-granulaires en fonction du volume de ciment comme indicateur de pompabilité (adapté de Kempster, 1969).....	38
Figure 1.16 : Problème de friction excessive et de ségrégation (Neville, 1995) .....	39
Figure 1.17 : Relation entre le rapport E/C et la pression axiale requise pour dépasser la contrainte de friction (Adapté de Ede, 1957).....	42
Figure 1.18 : a) Agitateur du MK1, b) Vue du rhéomètre MK2 en entier.....	44
Figure 1.19 : BT-RHEOM [Hu, 1995] .....	46

Figure 1.20 : Rhéomètre IBB : a) détail de l'agitateur; b) version de laboratoire; c) version transportable en chantier.....	45
Figure 1.21 : Tribomètre à béton développé par Kaplan (2000) .....	48
Figure 1.22 : Appareil de mesure de la friction développé par Morinaga (1973) .....	49
Figure 2.1 : Croquis du tribomètre.....	53
Figure 2.2 : Photos du tribomètre : à gauche, vue générale avec tribomètre en caoutchouc et à droite, vue de près avec tribomètre en acier en mouvement. ....	54
Figure 2.3 : Profil de vitesse en conduite pour un fluide homogène Newtonien (à gauche) et pour un fluide homogène Binghamien (à droite).....	55
Figure 2.4 : Profil de vitesse en conduite pour le béton .....	55
Figure 2.5 : Schématisation du protocole d'essai utilisé pour l'essai tribologique .....	57
Figure 2.6 : a) Exemple de résultat obtenu avec l'essai tribologique; b) paramètres tribologiques schématisés graphiquement .....	57
Figure 2.7 : Relation entre les paramètres tribologiques mesurés avec le tribomètre en caoutchouc et celui en acier .....	61
Figure 3.1 : Rhéomètre IBB. À gauche la version originale et à droite la version portable. ....	65
Figure 3.2 : Photos du tribomètre. À gauche, vue générale du tribomètre en caoutchouc et à droite, vue de près du tribomètre en acier.....	65
Figure 3.3 : Photo de la pompe de laboratoire.....	66
Figure 3.4 : Schéma du circuit de pompage.....	67
Figure 3.5 : Capteur de pression à membrane (à gauche) et photo du capteur monté dans son support (à droite) .....	68
Figure 3.6 : Montage utilisé pour l'étalonnage des capteurs de pression en laboratoire .....	69
Figure 3.7 : Courbes d'étalonnage des capteurs utilisés en laboratoire .....	70
Figure 3.8 : Photo de la pompe à béton de chantier.....	71
Figure 3.9 : Schéma illustrant la position des capteurs sur le camion pompe .....	72
Figure 3.10 : Schéma de la flèche rapportée de façon linéaire montrant la position des capteurs de pression.....	72
Figure 3.11 : Assemblage sur un boyau du camion-pompe d'un capteur de pression. Sur la photo, un faux capteur est installé. ....	73
Figure 3.12 : Étalonnage des capteurs de pression installé sur le camion pompe .....	74

Figure 3.13 : Courbe typique de pressions de pompage .....	75
Figure 3.14 : Temps de déplacement de la valve de déviation par rapport à la cadence des pistons .....	76
Figure 3.15 : Comparaison du coefficient de remplissage mesuré et du coefficient de remplissage prédit pour un mélange (SF-1-500) .....	78
Figure 3.16 : Relation entre le coefficient de remplissage réel mesuré le coefficient d'efficacité .....	79
Figure 4.1 : Effet du volume de pâte sur les propriétés de pompage.....	82
Figure 4.2 : Effet d'un volume de pâte excessif sur la courbe de pression .....	83
Figure 4.3 : Effet du type de liant sur les propriétés de pompage pour les mélanges contenant 32% de pâte de liant en a) et 38% de pâte de liant en b).....	84
Figure 4.4 : Effet du type de liant sur les propriétés de pompage pour les mélanges comparés à masses constantes de liant ( $450 \text{ kg/m}^3$ ) .....	85
Figure 4.5 : Effet du rapport E/L sur les propriétés de pompage.....	86
Figure 4.6 : Pertes de charges dans la valve de déviation, un coude et réducteur. ....	88
Figure 4.7 : Effet d'un haut rapport E/L sur la courbe de pression .....	89
Figure 4.8 : Présentation de trois forme de plateaux de pompage pour les mélanges à air entraîné. a) SF01A, b) SF02A, c) SF03A .....	90
Figure 5.1 : Comparaison entre les mesures réelles et les prédictions des pression de pompage avec le modèle en utilisant un $k_r=0,80$ .....	95
Figure 5.2 : Comparaison entre les mesures réelles et les prédictions des pressions de pompage avec le modèle en utilisant le $k_r$ mesuré .....	96
Figure 5.3 : Validation du modèle : a) en utilisant le coefficient de remplissage mesuré; b) en supposant un coefficient de remplissage fixe = 0,80. ....	97
Figure 5.4 : Proportion volumique occupée par la couche limite .....	98
Figure 5.5 : Évolution de la vitesse et de l'apport en pâte de ciment à la couche limite dans un réducteur .....	99
Figure 5.6 : Comparaison de la pression mesurée en amont et en aval d'un réducteur .....	101
Figure 5.7 : Pression en amont et en aval d'une série de coudes totalisant 270 degrés .....	102
Figure 5.8 : Prédiction de la pression statique en fonction de la hauteur maximale de la flèche (a) et de la hauteur de la fin de la flèche (b) .....	105

Figure 5.9 : Exemple d'une configuration de la flèche pour le calcul de la perte de charge entre deux capteurs .....	106
Figure 5.10 : Comparaison entre la différence de pression prédite et la différence de pression mesurée en tenant compte de la hauteur et des propriétés tribologiques .....	108
Figure 5.11 : Prédiction de la pression de pompage pour la flèche complète sans considérer les coudes (a) et en considérant les coudes (b) .....	110
Figure 5.12 : Comparaison entre les paramètres tribologiques et rhéologiques .....	112
Figure 5.13 : Relations entre les propriétés tribologiques et rhéologiques pour les mélanges de béton de la série préliminaire .....	113
Figure 5.14 : Prédiction du coefficient de remplissage à partir des paramètres rhéologiques .....	115

## Introduction générale

Le pompage du béton est une technique de mise en place du béton frais utilisée depuis plusieurs années. Le béton est déposé dans une pompe à béton qui achemine le béton dans des boyaux, souples en caoutchouc ou rigides en acier, directement à l'endroit désiré. Lors de ces opérations, plusieurs problèmes de blocage peuvent survenir. L'arrivée de nouveaux adjuvants pour béton, d'agents colloïdaux et d'ajouts cimentaires divers (souvent des déchets industriels) a modifié remarquablement la rhéologie du béton frais par rapport aux bétons usuels de sorte que les divers intervenants lors du pompage rencontrent encore plus de problèmes. Des études récentes (Chouinard, 1998; Kaplan, 2000) ont montré qu'il est possible d'évaluer la facilité au pompage (la friction le long des parois des boyaux de pompage) de certains mélanges de béton à partir de la mesure de la rhéologie du béton frais.

Peu de chercheurs se sont intéressés aux problèmes de pompage du béton, probablement à cause de la complexité de mener une campagne de recherche sur ce sujet. Les études ont souvent porté sur un aspect particulier de la problématique du pompage du béton comme par exemple, la perte d'air entraîné lors du pompage, la stabilité sous pression des bétons etc. La pompabilité est définie généralement comme la mobilité et la stabilité sous pression d'un béton. Cette thèse s'intéresse surtout aux problèmes de mobilité sous pression.

La plus récente étude menée sur le sujet est celle de Kaplan (2000). Il a montré que seule la mesure rhéologique ne pouvait servir à déterminer les pression de pompage. Pour décrire l'écoulement, il faut caractériser les propriétés de la couche lubrifiante. Kaplan (2000) a développé un tribomètre rotatif qui mesure les propriétés entre une paroi d'acier et le béton frais. Les propriétés mesurées avec son tribomètre rotatif permettent de bien prédire la courbe débit en fonction de la pression pour son installation de pompage.

Le premier objectif de cette thèse est de développer un tribomètre adaptable au rhéomètre IBB et de valider les résultats obtenus avec cet outil. Un tribomètre à paroi en caoutchouc et un autre à paroi en acier seront développés pour bien mesurer l'influence du type de surface sur les propriétés d'interface entre le béton frais et la paroi du tuyau. Le deuxième

objectif est d'évaluer l'influence de nouveaux types de ciment contenant des ajouts minéraux sur l'aptitude au pompage. Le troisième objectif est de développer un modèle prédictif de la pompabilité pour toute configuration de circuit de pompage. Le modèle prendra en compte le type de boyau (acier ou caoutchouc), les réducteurs, les coudes et l'effet de la hauteur. Jusqu'à présent, certaines études montrent bien qu'il est possible de bâtir un tel modèle en se basant sur la théorie de la friction, cependant, une partie de l'information est manquante, notamment le comportement du béton dans les coudes, dans les réduits et le type de boyau (caoutchouc ou acier). Le dernier objectif est de valider le modèle en chantier en étudiant un camion pompe instrumenté de capteurs de pression.

La thèse est divisée cinq chapitres. Le premier chapitre est une revue de la documentation. Le deuxième chapitre présente le développement des tribomètres. Notamment, les hypothèses de base considérées et les équations servant à décrire les contraintes aux parois sont décrites. Le chapitre trois décrit les deux circuits expérimentaux. Le quatrième chapitre présente les essais et résultats sur l'effet des ajouts cimentaires, l'effet du volume de pâte et l'effet du rapport E/L sur le pompage. Enfin, le chapitre cinq présente une analyse des données recueillies pour valider le modèle de prédiction du pompage en prenant en compte le type de boyau, les coudes, les réducteurs et l'effet de la hauteur. La thèse se termine avec une conclusion générale et des suggestions de recherches futures.



# **Chapitre 1**

## **Revue de la documentation**

Ce chapitre présente une revue de la documentation sur le pompage du béton. Il parcourt en premier lieu les types de pompes et équipements couramment rencontrés en chantier. Par la suite, les techniques de prévision du pompage décrites dans les manuels de pompage sont couvertes. Enfin, les sujets de recherches systématiques sur le pompage, soient les recherches sur la mobilité, les recherches sur la stabilité et les recherches sur l'optimisation granulaire sont présentées. Comme le projet de recherche proposé est axé sur la mobilité, une courte section sur la mesure de la rhéologie et de la tribologie complète ce chapitre.

## 1.1 Mise en contexte

Le pompage du béton est une technique de mise en place du béton frais utilisée depuis plusieurs années. Le béton est déposé dans une pompe à béton qui achemine le béton dans des boyaux, souples en caoutchouc ou rigides en acier, directement à l'endroit désiré. Lors de ces opérations, plusieurs problèmes de blocage peuvent survenir. L'arrivée de nouveaux adjuvants pour béton, d'agents colloïdaux et d'ajouts cimentaires divers (souvent des déchets industriels) a modifié remarquablement la rhéologie du béton frais par rapport aux bétons usuels de sorte que les divers intervenants lors du pompage rencontrent encore plus de problèmes. Chouinard (1998) a utilisé la mesure de rhéologie pour développer son modèle de prédiction empirique de la pression. Plus récemment, Kaplan (2000) a montré qu'il est nécessaire, en plus de la mesure rhéologique, d'utiliser la mesure tribologique pour établir un modèle de prédiction de la pression de pompage. Le but de ce projet est d'amasser les données manquantes sur les pertes de charge dues à toutes les singularités rencontrées en pratique (coudes et réducteurs principalement) et de développer un modèle prédictif de la capacité d'un béton à être pompé selon une certaine configuration de pompage. Ce modèle inclura les différents ajouts minéraux utilisés de nos jours dans le béton de même que certains adjuvants destinés spécifiquement au pompage des bétons.

Pour pouvoir utiliser la technique de pompage pour transporter le béton frais, il est nécessaire d'avoir recours à un béton dit : « pompable ». La pompabilité du béton est une caractéristique plutôt difficile à définir. La pompabilité est définie généralement comme la mobilité et la stabilité sous pression d'un béton (Beaupré, 1994). Il s'agit de la capacité d'un béton frais à se déplacer sous l'action d'une pression dans un milieu confiné tout en maintenant ses propriétés initiales (Gray, 1962).

Le pompage du béton frais et le déplacement de celui-ci dans les conduites de pompage font appel à des notions d'hydraulique relativement complexes. Le comportement rhéologique du béton frais, normalement estimé comme étant Binghamien (Tattersall et Banfill, 1983), n'est pas aussi simple que celui de l'eau (fluide Newtonien le plus connu).

## 1.2 Types de pompes à béton et équipement

Selon Weber (1963), la première pompe à béton a vu le jour en 1913 aux États-Unis (Figure 1.1a). Cette pompe fonctionnait sur le principe d'un piston poussé par une force mécanique. Un mécanisme à guillotine servait à contrôler, à la sortie du béton de la trémie, l'entrée vers le ou les pistons de refoulement (Figure 1.1b). À cause d'un défaut de conception, cette pompe se brisa rapidement. Par la suite, en 1933, toujours aux États-Unis, les premières pompes commerciales ont vu le jour. À partir de ce moment, la technique du pompage s'est beaucoup développée, surtout après la deuxième guerre mondiale. Les systèmes hydrauliques plutôt que mécaniques sont nés, de même que le principe des pompes à deux pistons pour augmenter le débit de pompage (Weber, 1963).

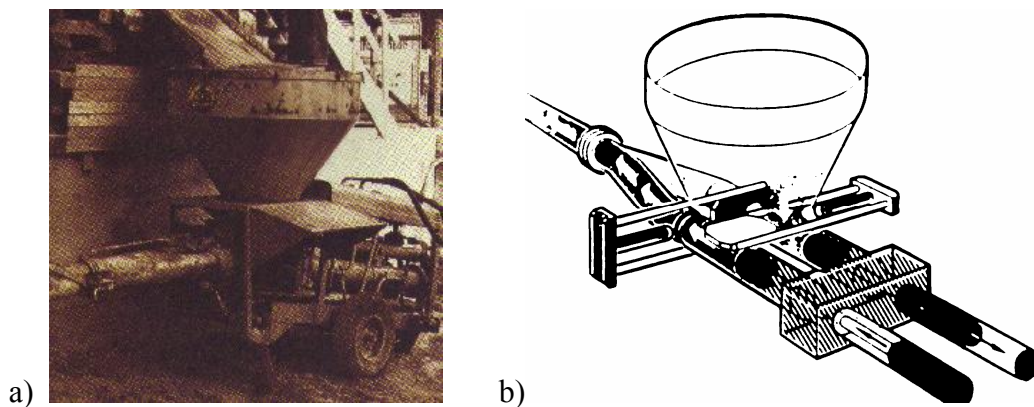


Figure 1.1 : a) Une des premières pompes à béton Schwing (Guide Schwing);  
b) Mécanisme des premières pompes à béton.

La plupart des pompes à béton modernes sont de type à pistons. Le béton est déposé dans la trémie de la pompe puis, par une ouverture placée au bas de la trémie, le béton est aspiré dans un cylindre par gravité et par la suction créée par le piston. Par la suite, un système de valves dirige le béton vers la sortie de la pompe et le piston expulse le béton. Les pompes à béton munies de deux pistons actionnent alternativement les deux pistons : pendant qu'un piston expulse le béton, le deuxième en aspire pour se remplir. La Figure 1.2 montre ce fonctionnement pour une pompe typique à deux pistons.

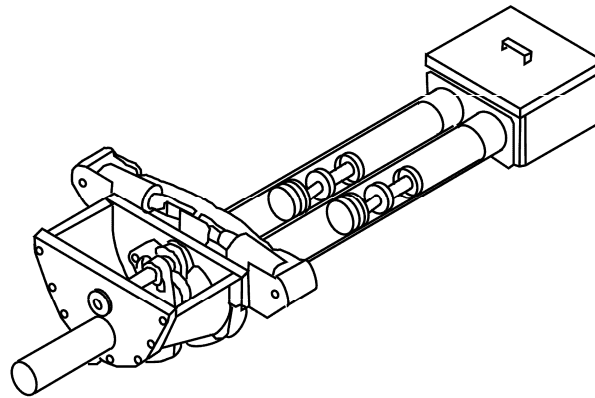


Figure 1.2 : Mécanisme d'une pompe hydraulique à deux pistons (Schwing)

Les pompes à pistons peuvent être classées en deux catégories : les pompes à grands débits, généralement montées sur un camion muni d'une flèche articulée, et les pompes à petits débits montées sur une remorque. Les pompes à flèche articulée sont utilisées sur les grands chantiers où de grands obstacles doivent être contournés ou lors du pompage en hauteur. Les opérations de mises en place sont facilitées dans ce cas par la flèche qui est télécommandée. L'opérateur de pompe n'a qu'à placer la sortie de la flèche à l'endroit désiré. Les pompes montées sur des remorques sont très utilisées pour le béton projeté par voie humide, lorsque de faibles débits sont requis ou lorsque l'accès est difficile.

Il existe aussi des pompes à mouvement péristaltique. Un tuyau souple est placé sous vide dans une chambre cylindrique. Un rotor muni de deux ou trois rouleaux de compression tourne en écrasant le boyau souple, faisant ainsi avancer le béton dans le boyau. La puissance et de débit de ce type de pompe sont plutôt faibles. Le débit est pratiquement régulier contrairement aux pompes à pistons et le coût de maintenance est faible car la seule pièce d'usure est le boyau souple qui est écrasé lors du pompage. La Figure 1.3 montre un schéma du fonctionnement de ce type de pompe.

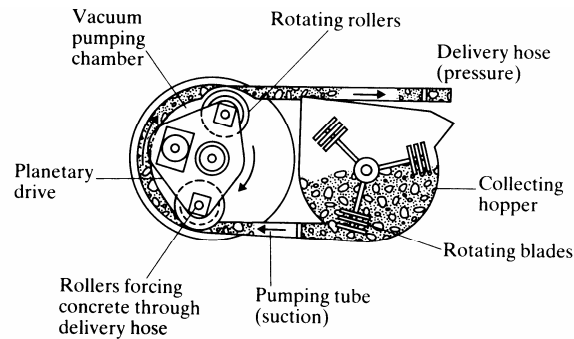


Figure 1.3 : Mécanisme d'une pompe péristaltique (Neville et Brooks, 1990)

### 1.3 Prédiction de la pression nécessaire au pompage

En pratique, que ce soit du côté du donneur d'ouvrage, de l'entrepreneur, du fournisseur de béton ou du propriétaire de pompe, il est intéressant de pouvoir prédire la pression nécessaire pour pomper un béton en fonction de la géométrie du circuit de pompage. Avec cette information, les divers intervenants de chantier peuvent choisir, en fonction des débits requis, une pompe à béton appropriée.

Certains guides fournissent des abaques développés à partir de l'expérience pratique. Généralement, ces abaques se basent sur l'affaissement ou l'étalement comme mesure de l'ouvrabilité du béton et, en fonction de la configuration de pompage et des débits requis, la pression requise par la pompe pour un pompage réussi est déterminée.

La Figure 1.4 présente un exemple d'abaque tiré du guide Schwing. Pour cet abaque par exemple, l'étalement du béton sert de mesure de la maniabilité requise pour la prédiction de la pression requise. Il est intéressant de noter que ces abaques incluent l'influence du diamètre du boyau de pompage. Pour un même débit, la vitesse d'écoulement est différente lorsque le diamètre de la conduite varie. Évidemment, les abaques prennent en considération la longueur équivalente incluant une proportion pour les coudes et réducteurs du circuit de pompage. Cet abaque ne tient pas compte du facteur d'efficacité de remplissage des pistons de refoulement.

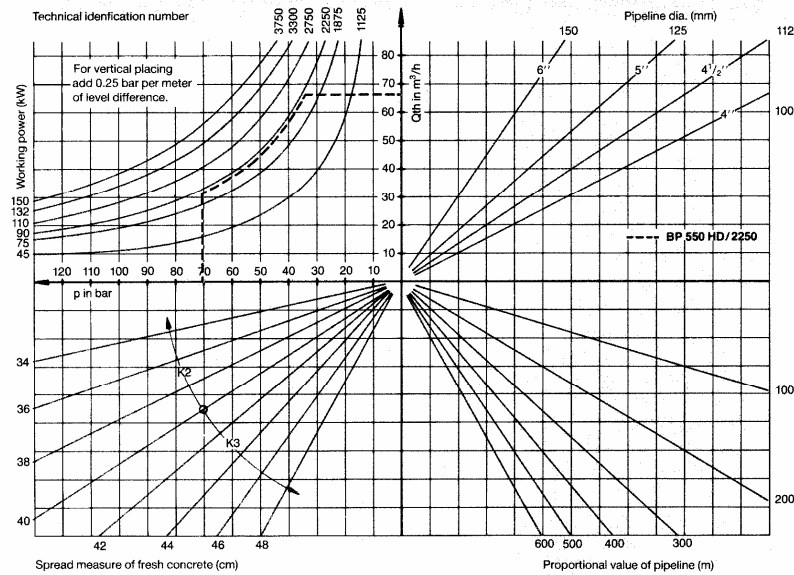


Figure 1.4 : Abaque typique servant à prédire les pressions de pompage par la mesure de l'affaissement basée sur des essais pratiques

## 1.4 Études portant sur le pompage du béton

La recherche plus systématique sur le pompage du béton a débuté dans les années 1950. Les études les plus récentes proviennent de la France (Kaplan, 2000) et du Canada (Chouinard, 1998). Les études portant sur le béton frais peuvent être classées tel que décrit à l'historgramme de la Figure 1.5.

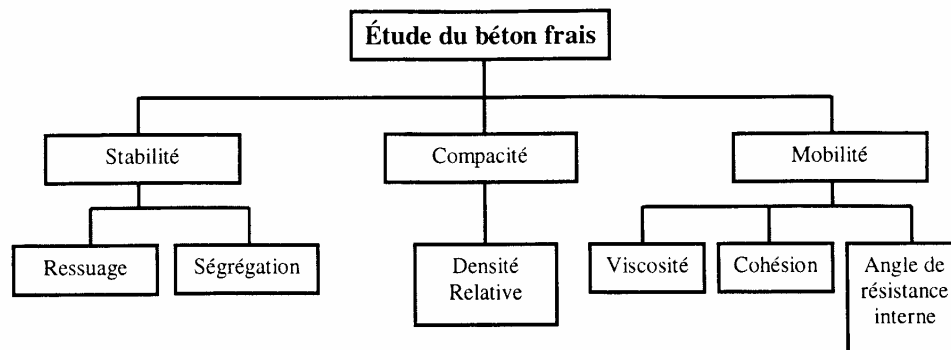


Figure 1.5 : Classification des types de recherche sur le béton frais selon Roy (1982)

Pour le cas du pompage, les auteurs ont systématiquement choisi les études sur la stabilité pour évaluer la pompabilité et/ou les études sur la mobilité. Pour quelques auteurs (Shilstone, 1990; ACI; Guide Schwing; Ragan, 1981; Kempster, 1969), la compacité granulaire ou l'étude du squelette granulaire a été un moyen d'expliquer les problèmes de stabilité et de mobilité. Il apparaît évident que la composition du squelette granulaire et la compacité ont une influence directe sur le comportement du béton frais.

### **1.4.1 Études portant sur la stabilité sous pression**

Les études sur la stabilité se divisent en plusieurs catégories. Les recherches sur la stabilité de l'air entraîné, les recherches sur le ressuage et les recherches sur les problèmes à l'amorçage dont la formation des bouchons.

#### **1.4.1.1 Perte de l'air entraîné et modification du réseau de bulles d'air**

La mise en place du béton par la technique du pompage est généralement accompagnée d'une perte d'air variant entre un et trois pourcents (Lessard et Dallaire, 1996, cité par Boulet 1997). Ce changement est nuisible dans le cas où le réseau de bulles d'air final n'est pas adéquat pour assurer une bonne résistance aux cycles de gel-dégel. Des mécanismes liés à la succion, la dissolution et l'impact ont été proposés par différents auteurs pour expliquer la perte d'air lors des opérations de pompage.

Lorsqu'il y a succion, ou création d'une pression négative dans le béton, la diminution de pression peut favoriser l'expulsion de l'air dans le béton ou causer le gonflement des bulles d'air. Le volume d'air peut doubler par exemple si la pression environnante diminue de moitié. Le mécanisme de succion peut se produire à deux endroits dans la configuration de pompage soit directement dans la pompe lorsque le piston aspire le béton lors du remplissage ou dans une section verticale descendante du circuit de pompage lorsqu'il y a chute libre du béton dans la conduite.

Le mécanisme d'impact attribue la perte d'air au choc qui se produit lorsque le béton frappe le fond du coffrage ou du béton déjà mis en place. Il semble évident que des bulles sont expulsées, et ce sont probablement les plus grosses (Hover, 1989).

Dyer (1991) décrit la dynamique de dissolution des bulles d'air par l'augmentation de pression lors du pompage. La Figure 1.6 décrit l'hypothèse de Dyer (1991). Lors de la pressurisation, ce sont les plus petites bulles qui sont dissoutes dans l'eau avoisinante. Lors de la dépressurisation (quand le béton se rapproche de la sortie du boyau), l'air dissout réapparaît mais principalement dans les plus grosses bulles qui n'ont pas été totalement dissoutes. Lors de ses recherches, Boulet (1999) indique que le temps de pressurisation est un facteur important. Aussi lors du pompage de béton haute performance, la perte d'air et la modification du réseau de bulles d'air est plus importante. Dans ce cas, c'est le pompage à plus haute pression (béton plus visqueux) qui détériore le réseau de bulles d'air.

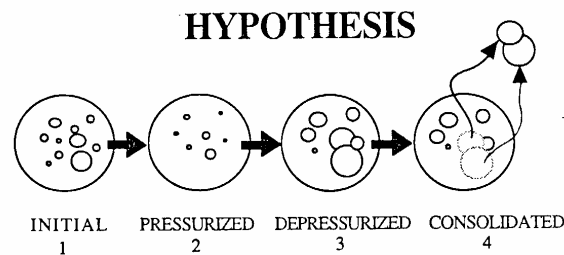


Figure 1.6 : Hypothèse sur la perte d'air lors du pompage (Dyer, 1991)

#### 1.4.1.2 Ressuage forcé

Le ressuage forcé est l'un des problèmes de stabilité du béton frais. Pour un mélange de béton instable, la pression exercée sur le béton lors du pompage peut entraîner la migration de l'eau de gâchage (Kempster, 1969; Gray, 1962; Browne and Bamforth, 1977). Localement, lors de la migration de l'eau, le béton devient plus sec et un blocage peut survenir. Browne et Bamforth (1977) ont proposé un appareil de ressuage forcé. La Figure 1.7a présente l'appareil. L'essai consiste à appliquer une pression de 500 psi (3450 kPa) sur



un échantillon de béton frais. Les volumes d'eau évacuée à la base à 10 secondes et à 140 secondes sont les valeurs retenues caractérisant la capacité du béton à retenir l'eau sous un gradient de pression. Ces auteurs ont déterminé un diagramme de pompabilité basé sur les résultats de l'essai au ressuage forcé (Figure 1.7b). Le diagramme présente une zone correspondant aux propriétés requises pour que le mélange soit pompable en fonction de l'affaissement et des mesures réalisées avec l'appareil de ressuage forcé.

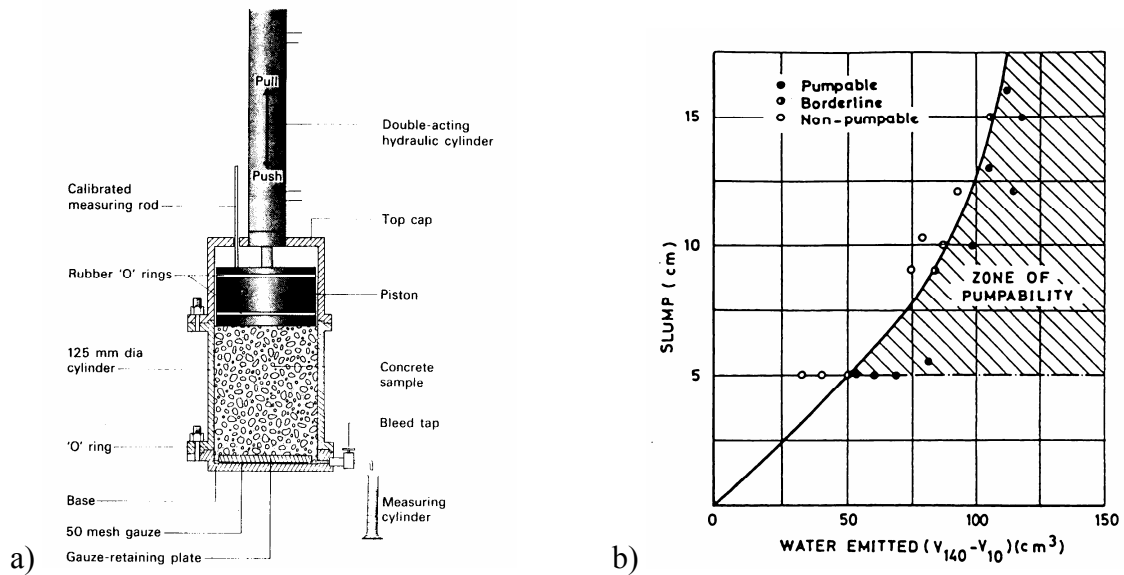


Figure 1.7 : a) Appareil pour réaliser l'essai de ressuage forcé; b) Diagramme permettant de prédire la pompabilité.

Kaplan (2000) a développé un essai similaire pour mesurer le ressuage du béton. L'essai consiste à utiliser le récipient d'un aéromètre volumétrique couramment utilisé en chantier (Figure 1.8a). Le tube métallique qui sert à évacuer l'air lors de l'essai de teneur en air doit être enlevé. La colonne graduée est remplie de tétrachloréthylène (densité = 1,59). L'eau qui ressuage du béton remonte à la surface du cylindre gradué et le volume d'eau évacué est mesuré. La pression exercée sur le béton lors de la réalisation de cet essai est beaucoup plus faible que pour l'essai proposé par Browne et Bamforth (1977), ce qui est beaucoup plus réaliste du gradient de pression réellement appliqué sur le béton dans un boyau de pompage. Kaplan (2000) a déterminé pour ses mélanges de béton que pour éviter la

formation de bouchon lors de l'amorçage du circuit de pompage il faut viser une vitesse de ressuage la plus faible possible. La Figure 1.8b présente pour ses mélanges de béton ceux qui ont pompés et ceux qui ont causé des blocages en fonction de la vitesse de ressuage mesurée à l'aide de son appareil.

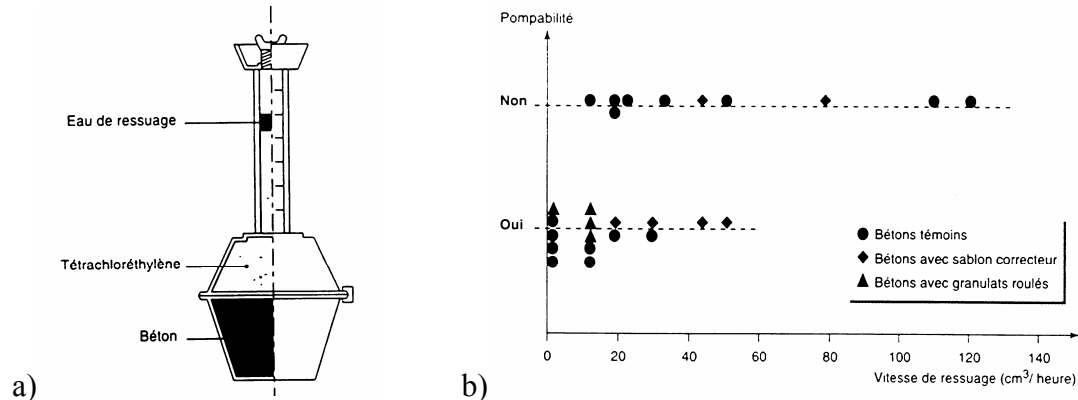


Figure 1.8 : a) Essai de ressuage développé par Kaplan (2000); b) Interprétation des résultats

#### 1.4.1.3 Amorçage du circuit de pompage

Lors de l'amorçage du circuit de pompage, une barbotine composée de ciment et d'eau, à laquelle on ajoute parfois du sable, est utilisée. La barbotine a pour but de lubrifier la paroi des tuyaux du circuit de pompage. Kaplan (2000) a proposé qu'à chaque coup de piston, lorsque la barbotine utilisée n'est pas assez consistante, les gros granulats sont littéralement projetés dans la barbotine par un effet d'inertie. Lorsque la barbotine n'est pas assez consistante pour retenir en suspension ces gros granulats, il y a ségrégation et les gros granulats forment un bouchon. Kaplan (2000) a utilisé deux types de ciments, l'un pour la barbotine et l'autre pour le béton et il a pu confirmer sa théorie en analysant la composition des bouchons formés lors de l'amorçage. Kaplan (2000) soutient qu'il donne une explication qualitative à ce mécanisme mais que des réponses quantitatives sont loin d'être évidentes.

### 1.4.2 Études portant sur la mobilité et la friction

Ede (1957) a confirmé lors de ses travaux que les conditions hydrauliques peuvent être appliquées au béton seulement lorsque ce dernier est en état saturé (voir section 1.4.4.4). Il a montré que la résistance à l'écoulement (friction) du béton frais est indépendante de la pression appliquée sur celui-ci. Ceci a pour conséquence que si le béton demeure homogène dans le boyau, la perte de charge doit être linéaire dans une section droite ce qui est le cas pour les béton sans air.

Pour un fluide se déplaçant dans une conduite circulaire à vitesse constante, en égalisant les forces agissant sur un élément de fluide, la résistance à l'écoulement est définie comme suit :

$$R = \frac{D}{4} \cdot \frac{dp}{dx} \quad [ 1.1 ]$$

où :

R : résistance à l'écoulement (force par unité de surface interne du tuyau circulaire);

D : diamètre du tuyau;

$dp/dx$  : le gradient de pression.

Plusieurs auteurs ayant réalisés des travaux sur le pompage en mesurant les pressions de pompage à différents endroits du circuit de pompage sont arrivés à des résultats similaires. Une équation générale a été développée vers la fin des années 50 par Alekseev (1952) décrivant la friction en fonction de la vitesse. L'équation prend la forme suivante :

$$F = a + d \cdot V^n \quad [ 1.2 ]$$

où (F) est la friction à la paroi du tuyau de pompage, (a) est un paramètre statique, (d) un paramètre dynamique et (n) un exposant d'ajustement de la loi.

Ede (1967) a repris cette équation et les coefficients (a) et (d), reliés aux propriétés du béton frais, sont déterminés à l'aide de l'essai d'affaissement. Plus tard, Weber (1963) et Morinaga (1973) ont obtenus des relations similaires. Le Tableau 1.1 présente les chercheurs principaux qui ont travaillé sur le concept de la friction.

Tableau 1.1 : Principaux chercheurs ayant travaillé sur la friction

Année	Chercheurs	Pays
1949	Dawson	Angleterre
1952	Alekseev	Russie
1957	Ede	U.K.
1963	Weber	Allemagne
1970	Loadwick	U.K.
1973	Morinaga	Japon
1977	Browne and Bamforthe	Angleterre
1979	Sukata et al	Japon
1983	Tattersall and Banfill	Angleterre
1994	Beaupré	Canada
1998	Chouinard	Canada
2000	Kaplan	France

La plupart de ces chercheurs s'entendent pour décrire l'écoulement du béton dans une conduite comme un écoulement bouchon. La Figure 1.9 montre ce type d'écoulement.

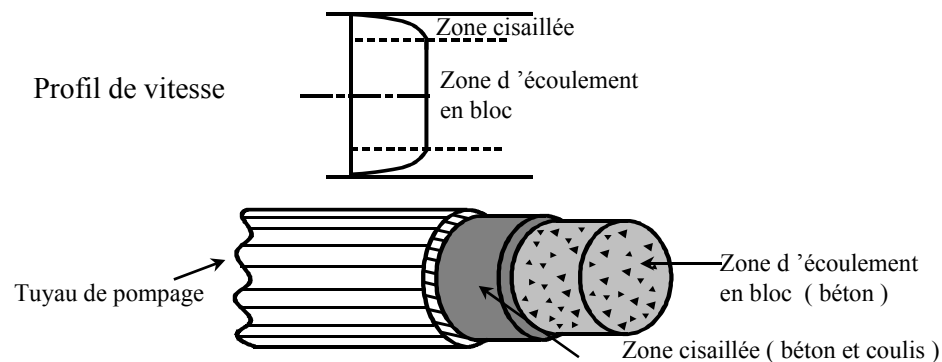


Figure 1.9 : Écoulement en bloc

Tous ces chercheurs ont établi une relation entre la vitesse d'écoulement du béton en conduite et la friction. La Figure 1.10 montre diverses relations obtenues et leur variabilité. Cette variabilité peut être expliquée en grande partie par le terme dynamique de l'équation [ 1.2 ] qui est estimé par l'essai d'affaissement. Ce dernier est un essai quasi-statique et il n'est donc pas approprié pour mesurer un effet dynamique relié à l'écoulement.

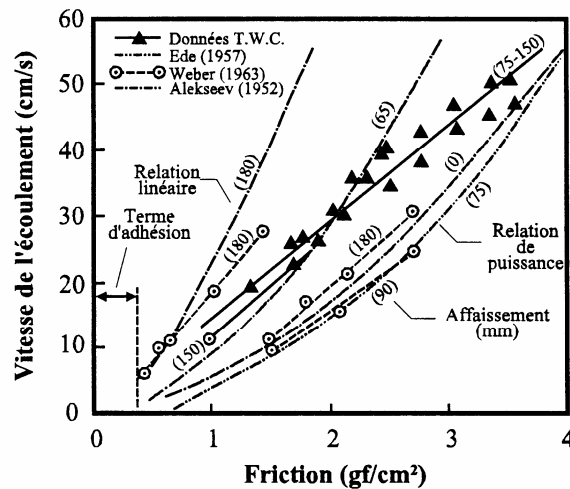


Figure 1.10 : Résultats de différents auteurs sur la friction (Browne and Bamforthe, 1977)

Des études plus récentes (Chouinard, 1999; Kaplan, 2000) montrent des modèles de prédiction de la friction à partir des propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique). Ces modèles, l'un défini à partir d'un circuit de pompage de boyaux de caoutchouc souple et l'autre basé sur un circuit fixe de boyaux en acier, sont plus complets car ils intègrent une mesure dynamique (la viscosité plastique) sur le béton frais. La Figure 1.11a présente la comparaison entre la friction prédite et la friction mesurée pour le modèle de Chouinard (1998).

Kaplan propose d'intégrer en plus de la mesure rhéologique du béton la mesure des propriétés de l'interface à son modèle. Ainsi, il obtient une relation qui contient deux pentes différentes entre la vitesse d'écoulement et la pression requise pour le pompage

(Figure 1.11b). La première portion de son modèle est décrite entièrement par les propriétés de l'interface (écoulement par glissement) alors que la deuxième portion intègre les propriétés rhéologiques du béton (écoulement par glissement et par cisaillement du béton).

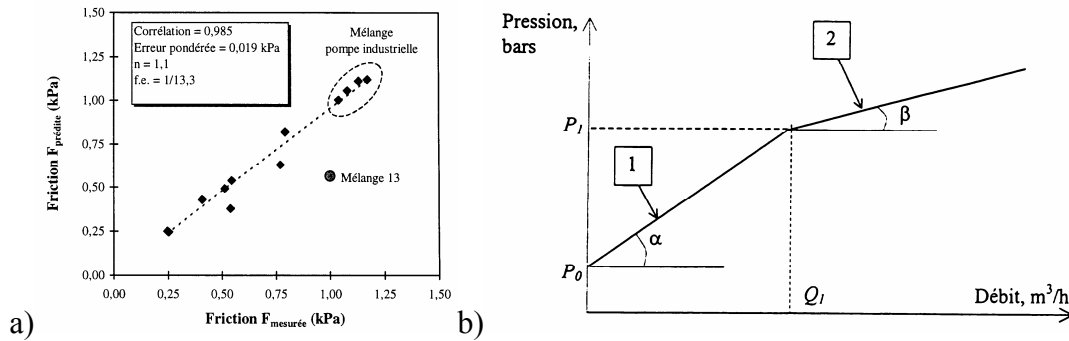


Figure 1.11 : a) Modèle de prédiction de la friction par Chouinard (1998); b) Modèle de prédiction de la pression de pompage par Kaplan (2000).

En supposant une couche lubrifiante de comportement Binghamien et un noyau central composé de béton ayant aussi un comportement Binghamien, le débit total ( $Q_{tot}$ ) est la somme du débit par cisaillement (décrit par l'équation de Buckingham-Reiner) et du débit par glissement ( $Q_g$ ) :

$$Q_{tot} = \frac{\pi R^4}{8\mu_{beton}} \frac{dp}{dx} \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{2\tau_{0beton}}{Rdp} \frac{dx}{dx} + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{2\tau_{0beton}}{Rdp} \frac{dx}{dx} \right)^4 \right] \cdot k_r \cdot 3600 + Q_g \quad [ 1.3 ]$$

Kaplan (2000) a utilisé cette hypothèse pour établir son modèle. Il a négligé le terme en puissance 4 dans la portion de l'équation du débit par cisaillement et utilisé les paramètres déterminés par son tribomètre (seuil de l'interface et viscosité de l'interface) pour définir le débit par glissement. En calculant à partir de quelle vitesse le cisaillement initie un écoulement supplémentaire dans la partie central (dans le béton) et en réorganisant les

termes de l'équation, Kaplan (2000) a obtenu l'expression suivante (deuxième pente de son modèle de la Figure 1.11 b) :

$$P = \frac{2L}{R} \left[ \tau_{0i} + \frac{\frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} - \frac{R}{4\mu} \tau_{0i} + \frac{R}{3\mu} \tau_0}{1 + \frac{R}{4\mu} \eta} \eta \right] \quad [ 1.4 ]$$

À ce moment, le cisaillement est plus important que le seuil de cisaillement du béton et l'écoulement a lieu aussi dans le béton. Dès lors, les propriétés rhéologiques du béton en plus des propriétés de l'interface doivent être prises en compte.

La première pente est décrite par l'équation [ 1.5 ]:

$$P = \frac{2L}{R} \left( \tau_{0i} + \frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} \eta \right) \quad [ 1.5 ]$$

- où :
- P : Pression (Pa)
  - L : Longueur du boyau (m)
  - R : Rayon du boyau (m)
  - Q : Débit moyen en (m<sup>3</sup>/h)
  - Kr : Coefficient de remplissage
  - $\tau_{0i}$  : Seuil de l'interface (Pa)
  - $\eta$  : Viscosité de l'interface (Pas/m)

Cette équation est valide lorsque :

$$P \geq \frac{2L}{R} \cdot \tau_0 \quad [ 1.6 ]$$

### 1.4.3 Études portant sur les coudes et les réducteurs

À peu près toutes les recherches sur le pompage portent sur l'écoulement dans un boyau simple. En pratique, des coudes et réducteurs sont utilisés couramment sur une configuration de circuit de pompage. Ces singularités offrent une certaine résistance à considérer dans le calcul des pertes de charge ou de la pression nécessaire au pompage.

Morinaga (1973) a étudié l'écoulement dans les coudes. Son hypothèse de base est que la contrainte d'écoulement ( $f$ ) répond à une loi de type :

$$f = k_1 + k_2 v \quad [ 1.7 ]$$

où :

$k_1$  : coefficient d'adhésion;

$k_2$  : coefficient de vitesse;

$v$  : vitesse du béton.

Ces coefficients sont évalués à partir de réels essais de pompage sur une section droite de boyau (voir section 1.5.2).

En étudiant l'équilibre des forces agissant sur un élément de béton dans un coude (Figure 1.12.) il démontre l'équation suivante décrivant la perte de charge pour un coude :

$$\Delta P = \left[ \frac{2}{r} R_b \left\{ k_1 + k_2 \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \bar{v} \right\} + R_b \theta \gamma \sin \varphi \right] \cdot \frac{2 \cdot (1 - \cos \theta)}{\sin \theta} \quad [ 1.8 ]$$

où :

$r$  : rayon du boyau;

$R_b$  : Rayon de courbure du coude;

$\theta$  : Angle du coude;

$\psi$  : Angle entre le plan décrit par le coude et la surface;



- $t_1$  : temps effectifs de pompage;
- $t_2$  : temps d'arrêt entre deux coup de piston;
- $k_1$  : coefficient d'adhésion;
- $k_2$  : coefficient de vitesse.

Morinaga (1973) décrit l'écoulement du béton dans les conduites comme un écoulement par glissement. Les termes  $k_1$  et  $k_2$  doivent être déterminés à partir de l'essai décrit par cet auteur (voir section 1.5.2).

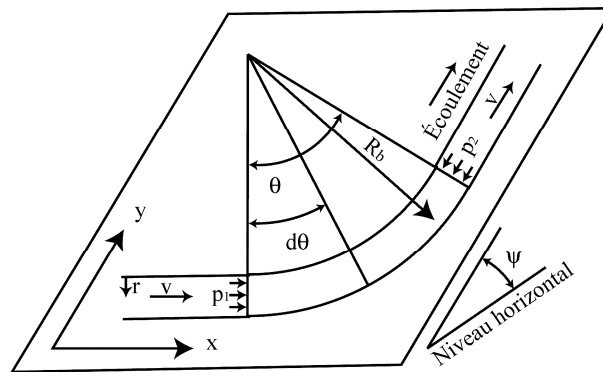


Figure 1.12 : Équilibre des forces sur un coude (Morinaga, 1973)

Kaplan (2000) a observé pour son installation de pompage que les coudes n'offraient pas de perte de charges supplémentaires que celle équivalant à la longueur même du coude. Le rayon des coudes étudiés sur son installation de pompage était de 0,28 m.

De façon empirique, le guide Schwing indique qu'un coude de 90 degrés de 1m de rayon est équivalent à une section de 3 m de boyau droit et qu'un coude de 90 degrés de 0,25 m de rayon équivaut à 1 m de boyau droit. Il s'agit d'environ deux à trois fois la longueur de l'arc de cercle défini par le coude.

Les réducteurs sont connus pour être un endroit privilégié pour la formation des bouchons. Pratiquement tous les camions pompe à béton ont au moins un réducteur à la sortie de la

pompe. Généralement les pistons de refoulement sont de diamètre très élevés (225 mm, parfois même 300 mm) alors que la ligne de pompage installée sur la flèche possède un diamètre usuel de 125 mm pour minimiser la masse de béton supportée par la flèche.

Le guide Schwing traite le réducteur comme un élément de sécurité. On y explique que lors du passage du béton dans le réducteur, si un blocage survient c'est que le béton n'est pas assez déformable : il doit alors être reformulé.

Morinaga (1973) a décrit l'écoulement dans de réducteur de façon analytique. La Figure 1.13 présente les forces en jeu lors du passage du béton dans un réducteur.

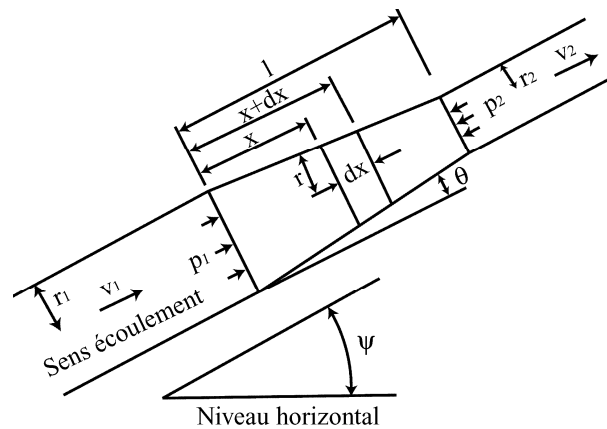


Figure 1.13 : Équilibre des forces sur un réducteur (Morinaga, 1973)

Morinaga (1973) démontre l'équation suivante décrivant la perte de charge dans un réducteur :

$$\Delta p = \left[ \frac{r_2 + r_1}{r_2^2} k_1 l + \frac{2}{r_2 - r_1} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 v_1 k_2 l \cdot \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right] \cdot \cos \theta$$

$$+ \rho \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \cdot \left[ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right] \cdot v_1^2 + \frac{\gamma}{3} l \left[ 1 + \frac{r_1}{r_2} + \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \cdot \sin \psi - \left[ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right] \cdot P_1$$
[ 1.9 ]

où :

- $r_1$  : rayon amont du réducteur;
- $r_2$  : rayon aval du réducteur;
- $P_1$  : pression en amont du réducteur;
- $v_1$  : vitesse en amont du réducteur;
- $k_1$  : coefficient d'adhésion;
- $k_2$  : coefficient de vitesse;
- $\theta$  : angle de réduction;
- $\psi$  : angle entre le réducteur et le plan horizontal.

Si la réduction se fait sur une longueur relativement longue,  $\cos \theta=1$  et si l'effet de la gravité n'est pas considéré, l'équation peut être simplifiée à :

$$\Delta p = \left[ \frac{r_2 + r_1}{r_2^2} k_1 l + \frac{2}{r_2 - r_1} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 v_1 k_2 l \cdot \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right] - \left[ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right] \cdot P_1 \quad [ 1.10 ]$$

#### 1.4.4 Facteurs affectant la pompabilité

Tous les facteurs de la composition d'un mélange de béton affectent l'aptitude au pompage du béton. Règle générale, tous les auteurs ayant publiés sur le sujet traitent cette question mais de façons différentes. Le béton est un mélange granulaire comportant un certain volume de vides. Ces vides doivent être remplis par la pâte (liant, eau et air) pour donner la déformabilité nécessaire au béton.

Les facteurs de la composition d'un mélange de béton sont pris en compte par les différents auteurs des façons suivantes:

- Simplement mesurer les vides et remplir avec la pâte de liant. Deux méthodes sont alors disponibles pour améliorer la pompabilité soient diminuer le volume des vides ou augmenter la pâte de liant;
- Viser une granulométrie totale (granulats fins et gros granulats combinés) selon une courbe bien étalée. De façon générale, en visant une granulométrie étalée, une compacité maximale est obtenue;
- Respecter une masse ou un volume de particules fines minimales que doit contenir le mélange de béton. Dans certains cas, des auteurs spécifient une courbe granulométrique en plus d'une teneur en particules fines à respecter.
- Une teneur en eau maximale existe au delà de laquelle les risques de ségrégation sont accrus.

En résumé, une granulométrie bien étalée procure pour ce mélange granulaire en particulier la teneur en vides minimale. En visant cette courbe granulométrique totale, on s'assure d'obtenir un volume minimum de vides à remplir avec la pâte. Les granulométries idéales sont en général riches en particules fines.

#### **1.4.4.1 Granulométrie**

Shilstone (1990) s'intéresse à l'optimisation granulaire pour réaliser la conception de mélange de béton. Il expose clairement que pour obtenir une résistance en compression maximale, le mélange granulaire doit être optimisé pour laisser le moins de vides possible et la pâte de ciment doit combler les vides, mais sans excès de pâte. Cet auteur mentionne toutefois qu'un mélange optimisé en terme de résistance à la compression n'est pas toujours facile à mettre en œuvre. Le mélange doit être aussi optimisé pour les méthodes de mises en place et méthodes de construction utilisées. Il propose une courbe granulométrique totale (gros granulats et fins granulats) présentée à la Figure 1.14.

Shilstone n'est pas le seul auteur à considérer la granulométrie complète plutôt que séparément un fuseau pour le sable et un autre pour la pierre. Le guide Schwing, l'ACI et

Ragan (1981) proposent eux aussi un fuseau ou une courbe optimale à viser pour obtenir une bonne pompabilité voir Figure 1.14.

Pour optimiser la compacité granulaire, la granulométrie doit être ajustée pour éviter les sauts brusques dans la courbe granulométrique. La forme et la grosseur des particules doivent donc être prises en considération puisque ces facteurs influencent grandement le volume des vides laissés entre les grains (Kempster, 1969). Tous les éléments relatifs au facteur de forme, densité et rugosité des granulats influencent aussi la compacité du mélange granulaire.

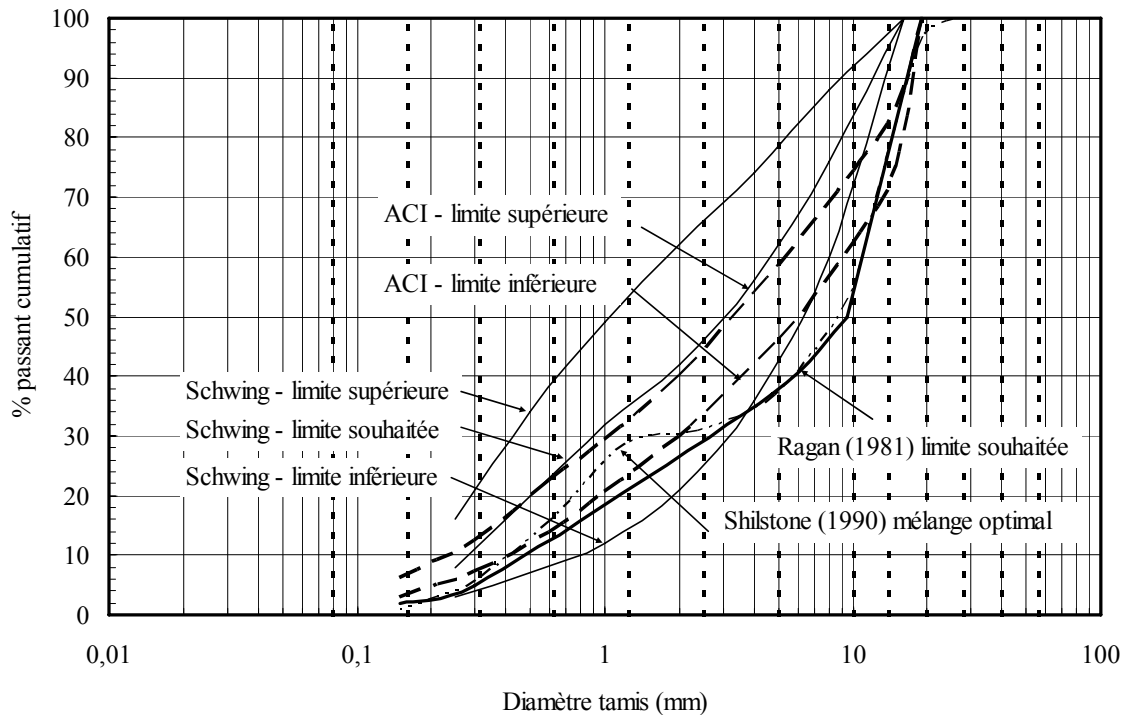


Figure 1.14 : Granulométrie complète souhaitée pour une dimension maximale des granulats de 19 mm selon ACI, Ragan et Schwing (16mm) (figure adaptée).

#### 1.4.4.2 Volume des vides

Un mélange de béton simple est composé de ciment, d'eau, de sable et de pierre. Le rôle de la pâte de ciment (l'eau et le ciment) est de remplir les vides laissés entre les grains de sable et de pierre. Une réduction du volume de la pâte de ciment (par conséquent une réduction du coût du mélange de béton) n'est possible qu'en réduisant le volume des vides laissés entre les particules granulaires (Goltermann et al., 1997). Le degré de compacité est fonction du type de granulat (forme, facteur de forme, granulométrie etc.). Powers (1968) spécifie toutefois que la combinaison idéale des granulats utilisés pour un certain mélange de béton n'est pas nécessairement celle avec la plus grande compacité.

C'est probablement Kempster (1969) qui a étudié en premier l'effet de la compacité granulaire et de la granulométrie sur la pompabilité du béton. Il a utilisé une pompe à piston unique et un circuit de pompage fermé instrumenté à l'aide de jauges de déformation installées sur les tuyaux d'acier pour mesurer les pressions de pompage à différents endroits. Il a réalisé des essais en produisant des mélanges de béton dont la courbe granulométrique était différente, en créant volontairement des manques pour certaines grosseurs de particules. Il a clairement identifié qu'en optimisant la courbe granulométrique, la quantité de vides entre les grains était minimisée et qu'il fallait ajouter au mélange de béton un volume de ciment (généralement on parle de volume de pâte mais l'auteur a traité ses données en volume de ciment) équivalent à ce vide pour que le béton soit pompable. Les mélanges produits avec une quantité de ciment inférieure à celle des vides mesurés ont failli au pompage.

		Volume des vides (%)			
		17%	20%	25%	28%
Contenu en ciment (% volumique)	Z 15%	Pompable	* Pompable mais bloqué pendant les essais	* Non pompable	Non pompable
	Y 20%	Pompable	Pompable	* Non pompable	Non pompable
	X 25%	Pompable	Pompable		* Non pompable
	W 30%	Pompable mais avec difficulté	Pompable		* Non pompable

\* Mélanges de béton pompable après que qu'un adjuvant à base d'éther de cellulose ait été ajouté

Figure 1.15 : Résultats des essais sur l'effet des vides inter-granulaires en fonction du volume de ciment comme indicateur de pompabilité (adapté de Kempster, 1969).

La Figure 1.15 montre le résultat de ses essais sur le volume des vides granulaires comme indicateur de pompabilité. Pour tous ses essais, le contenu en sable était de 35% par rapport au volume de granulats total et le volume d'eau était ajusté pour obtenir un affaissement de 75 mm. Les mélanges de béton sont pompables pour ceux ayant un volume de ciment supérieur au volume des vides. Cependant plus le volume des vides augmente, plus les mélanges deviennent difficiles à pomper. Pour les mélanges où le contenu en ciment est à peu près égal au volume des vides, la plupart n'étaient pas pompables mais sont devenus pompable lors de l'ajout d'un adjuvant à base d'éther de cellulose.

Une friction excessive peut se produire lorsque le mélange de béton ne contient pas beaucoup de pâte de ciment ou lorsque le squelette granulaire est très compact et que les particules granulaires sont très près les unes des autres. Le frottement entre les particules ou

celui entre les gros grains et la paroi du circuit de pompage font augmenter les pressions de pompage jusqu'à créer parfois un blocage. La Figure 1.16 (Neville, 1995) montre bien qu'il faut un certain volume de ciment pour combler l'espace entre les grains sans quoi le pompage est difficile, voire impossible. Aussi, des problèmes de ségrégation peuvent survenir si la quantité de particules fines dans le mélange est insuffisante ou que la compacité du squelette granulaire est faible. Dans ces cas, une séparation des gros granulats et de la pâte de ciment peut survenir et causer un blocage.

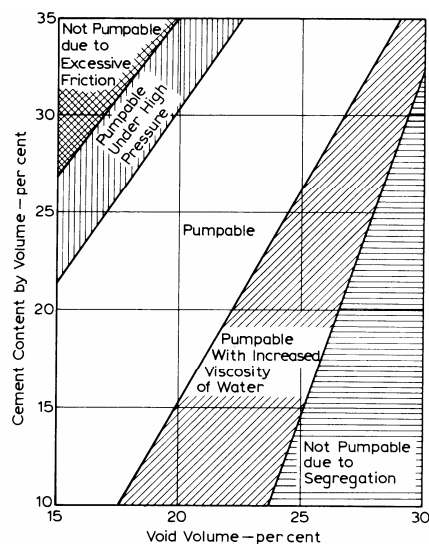


Figure 1.16 : Problème de friction excessive et de ségrégation (Neville, 1995)

Une étude récente sur le béton projeté par voie humide et armé de fibres de polyoléfine (Beaupré, Chapdelaine, Molez et Bissonnette, 1999) a utilisé ce même concept pour développer des mélanges de béton pompables et stables après projection. La quantité de vides était mesurée avec de l'eau ajoutée dans un mélange granulaire sans ciment et un volume de pâte de ciment équivalent à 5% de plus que les vides mesurés était ajouté pour produire le mélange de béton destiné à être pompé.

Shilstone (1990) a adopté un concept de volume de mortier (conjugué à une courbe granulométrie totale à suivre). Il insiste sur le fait qu'un mélange optimisé n'est pas



toujours intéressant sur le plan de la mise en place et que la teneur en mortier doit être ajustée en fonction de la mise en place. Le facteur de mortier consiste au volume de particules fines passant le tamis #8 (2,36 mm) ainsi que le liant et l'eau. À partir du moment où les granulats sont bien distribués et suivent la courbe granulométrique proposée, le mortier est le facteur déterminant des propriétés du béton (retrait, résistance en compression, finissabilité, pompabilité, etc.). Le facteur de mortier est donc au centre des conflits lors du design du mélange de béton puisqu'un mélange optimisé pour un retrait minimal par exemple pourrait ne pas être pompable. Shilstone (1990) a défini 10 classes de béton en fonction du facteur de mortier. Par exemple, pour un béton pompé dans des boyaux de 125 mm de diamètre, 52-54% de mortier est recommandé ce qui est plus que les 50-52% requis pour une mise en place à la chute dans des coffrages ouverts. Aussi, pour une mise en place à la pompe avec des boyaux plus petits que 100 mm de diamètre, il spécifie 58-60% de mortier.

#### **1.4.4.3 Teneur en fines**

Le guide Schwing indique une teneur minimale en ciment et aussi une teneur minimale en particules fines pour qu'un béton soit apte au pompage. Les particules fines sont celles du ciment, des ajouts cimentaires et les particules comprises entre 0 et 0,25 mm contenues dans le sable et la pierre. Le Tableau 1.2 présente les teneurs en fines suggérées par le Guide Schwing en fonction du diamètre maximal des granulats utilisés dans le mélange de béton. Le Guide spécifie aussi que lorsque des granulats concassés ou de formes allongée ou aplatie sont utilisés, le contenu en particules fines doit être augmenté de 10%.

Tableau 1.2 : Contenu minimal en particules fines suggéré en fonction du diamètre maximal des granulats dans le mélange de béton (Guide Schwing)

Dimension maximale des granulats utilisés (mm)	Contenu en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Contenu en fines par m <sup>3</sup> (incluant le ciment) (kg/m <sup>3</sup> )
8	-	525
16	-	450
32	240	400
63	-	325

Selon Neville et Brooks (1990), pour un béton contenant des granulats de diamètre maximal de 20 mm, l'optimum du contenu en sable se situe entre 35 et 40% (environ 840 à 960 kg/m<sup>3</sup> pour un béton de masse volumique égale à 2400 kg/m<sup>3</sup>) et le contenu en particules fines (plus petites que 0,300 mm) devrait être de 15 à 20% de la masse du sable.

Ragan (1981), tout en spécifiant une courbe granulométrique totale (Figure 1.14), stipule que les particules fines passant le tamis #50 (15-30%) ainsi que le tamis #100 (5-10%) ainsi qu'un minimum de 310 kg/m<sup>3</sup> (470 lb/yd<sup>3</sup>) de ciment sont les règles à suivre pour obtenir un béton pompable. L'ACI indique la même remarque quant au contenu en particules fines sur ces tamis. L'ACI propose de réduire de 10% la quantité de gros granulats pour procurer une marge de manœuvre de sécurité puisque les granulométries peuvent être légèrement variables.

#### 1.4.4.4 Volume d'eau dans le béton

La quantité d'eau ajoutée au mélange de béton influence grandement sa rhéologie (diminution de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement (Tattersall et Banfill, 1983). Outre l'effet sur la rhéologie, l'ajout de l'eau est le facteur le plus important à contrôler

pour éviter le risque de ségrégation. Le Guide Schwing suggère de ne pas dépasser un rapport E/C de 0,65 pour éviter les risques de ségrégation et ainsi éviter les blocages. Neville et Brooks (1987) confirment aussi qu'il ne faut pas trop d'eau dans le mélange de béton. Leur donnée est plutôt qualitative puisqu'ils ne donnent pas exactement la teneur en eau à ne pas dépasser.

Ede (1957) a étudié la pompabilité de mélanges de béton ayant différents rapports E/C (0,30 à 0,60) mais des teneurs en ciment constantes. Il a observé que le mélange de béton doit contenir assez d'eau pour saturer les vides entre les granulats sans quoi la pression requise pour le pompage augmente considérablement. La Figure 1.17 montre les trois zones identifiées. Lorsque le béton ne contient pas assez d'eau et que les vides entre les granulats ne sont pas comblés, il y a écoulement par friction solide et la pression requise pour qu'il y ait pompage est très élevée. Par la suite, il y a une zone de transition et finalement, lorsqu'il y a une bonne quantité d'eau dans le mélange de béton il y a écoulement de type hydraulique et les pressions requises sont diminuées. Weber (1968), en citant Ede (1957) explique qu'outre l'effet de l'eau sur les pressions de pompage requises, il y a l'effet du volume de pâte qui affecte l'état saturé ou non-saturé du béton.

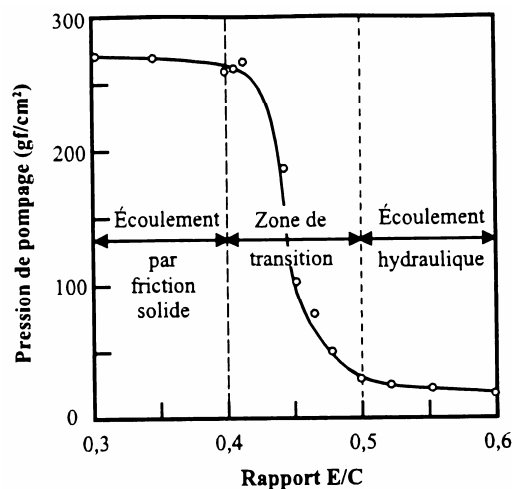


Figure 1.17 : Relation entre le rapport E/C et la pression axiale requise pour dépasser la contrainte de friction (Adapté de Ede, 1957)

## 1.5 Rhéologie et tribologie

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière. Pour le béton, on parle généralement de rhéologie pour l'étude du béton à l'état frais. Il est généralement admis (Tattersall et Banfill, 1983) que le béton frais a un comportement binghamien. La loi de comportement d'un fluide binghamien s'écrit :

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad [ 1.11 ]$$

où :

$\tau$  : contrainte de cisaillement (Pa);

$\tau_0$  : seuil de cisaillement (Pa);

$\mu$  : viscosité plastique (Pa.s);

$\dot{\gamma}$  : gradient de vitesse ( $s^{-1}$ );

La tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs. Les domaines du frottement, de l'usure et de la lubrification y sont donc inclus. Pour le cas du béton frais et plus précisément pour le cas du pompage du béton, la tribologie est l'étude de l'interface entre le béton frais et de la paroi du boyau (ou autre mobile utilisé pour réaliser un essai tribologique).

Cette section présente les essais rhéologiques et tribologiques existants.

### 1.5.1 Essais rhéologiques sur béton frais

Le viscosimètre à cylindres coaxiaux est utilisé pour étudier les pâtes de ciment par contre il n'est pas très adapté aux mélanges avec granulats. C'est Tattersall (1983) qui fut le premier à proposer des appareils adaptés à la suspension granulaire en introduisant des rhéomètres de type malaxeur. Le premier, le Mk I, est un malaxeur à mortier HOBART

muni d'un wattmètre comme indicateur de couple. Il s'agit alors d'une tige en forme de crochet (Figure 1.18a) qui tourne avec un mouvement planétaire dans le béton. Le malaxeur permet trois vitesses de rotation.

Par la suite, l'appareil a été modifié. Un cylindre muni de pâles de forme hélicoïdale interrompue (« interrupted helix ») tourne à l'intérieur d'un échantillon de béton de façon concentrique. Il s'agit alors du Mk II (Figure 1.18b). De plus, pour mesurer le couple, une jauge de pression installée sur la transmission hydraulique indique la force exercée par les pâles. Plusieurs auteurs ont apporté des modifications à cet appareil mieux connu sous le nom « two point test apparatus ».

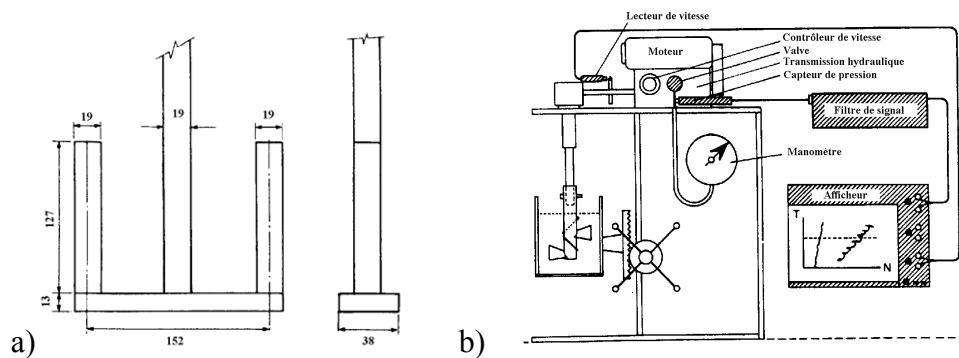


Figure 1.18 : a) Agitateur du MK1, b) Vue du rhéomètre MK2 en entier

Le MKIII a fait son apparition par la suite avec l'agitateur en H à mouvement planétaire. C'est cette dernière configuration que Beaupré (1994) a repris pour construire le « UBC Rheometer », rhéomètre entièrement piloté par ordinateur. Cet appareil est maintenant commercialisé sous le nom de : « Rhéomètre IBB ». Le principe de ce rhéomètre consiste en un agitateur à la forme d'un H qui tourne avec un mouvement planétaire dans le béton. Un capteur de vitesse enregistre automatiquement les vitesses sur l'ordinateur de même que les couples mesurés à l'aide d'une cellule de charge placée sur l'arbre principal. L'essai est piloté automatiquement par l'ordinateur. Ce rhéomètre est capable de mesurer les paramètres rhéologiques de bétons à maniabilité faible jusqu'à élevée.

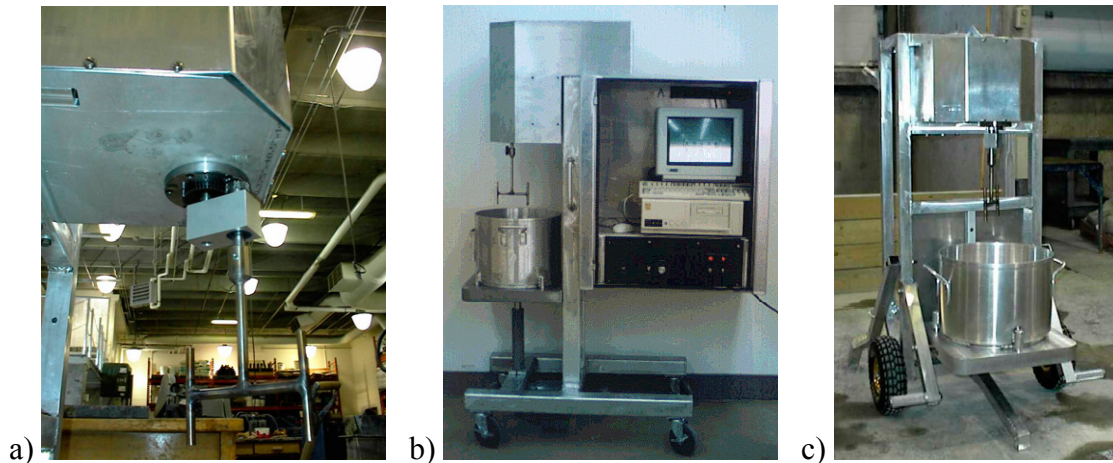


Figure 1.19 : Rhéomètre IBB : a) détail de l'agitateur; b) version de laboratoire; c) version transportable en chantier

La modélisation de ce mouvement planétaire est difficile et le développement d'équations empiriques décrivant l'écoulement est un travail fastidieux, voire impossible. Tattersall et Banfill (1983) proposent que si le taux de cisaillement moyen est considéré au lieu du taux de cisaillement effectif qui n'est pas constant dans tout l'échantillon, il est alors possible de calibrer en unités fondamentales les rhéomètres à agitateur à l'aide de liquides aux propriétés rhéologiques connues. Idéalement, pour utiliser cette méthode il faut utiliser des matériaux dont les propriétés rhéologiques sont semblables à celle normalement mesurées avec le rhéomètre. Pour le cas du béton, de telles substances ayant un comportement Binghamien et comportant une structure granulaire sont difficiles à trouver.

Les rhéomètres BML et BT-RHEOM ont fait leur apparition dans les années 1990. Leur configuration permet d'obtenir des mesures rhéologiques en unités fondamentales.

Ce sont Wallevik et Gjørsv (1990) qui ont développé le rhéomètre BML. Cet appareil s'approche beaucoup d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux. Des pales installées sur les cylindres limitent le glissement à la surface des cylindres. Cet appareil est entièrement piloté par ordinateur. Sa géométrie permet de développer facilement les équations pour déterminer les paramètres rhéologiques en unités fondamentales.

Le rhéomètre LCPC a été développé au Laboratoire central des ponts et des chaussées de Paris par une équipe multidisciplinaire dirigée par DeLarrard. C'est Sedran (1999) qui a

finalisé la mise au point. Sa géométrie est du type plan-plan (Figure 1.20). L'appareil est entièrement automatisé. Il permet la mesure de la dilatace en cours d'essai et permet aussi l'étude du comportement sous vibration. Il est conçu pour des bétons fluides (affaissement supérieur à 100 mm). Il semble que le joint d'étanchéité soit une partie assez sensible lors de la mesure du frottement. La présence de ce joint rend la mise en oeuvre difficile. L'effet de paroi est négligeable (Hu, 1995) et le développement d'équations mathématiques est possible pour obtenir des résultats en unités fondamentales. Le grand avantage de cet appareil est d'être transportable. Il peut être utilisé au chantier de même qu'au laboratoire. Cet appareil a récemment été modifié pour pouvoir réaliser un essai tribologique (voir paragraphe 1.5.2).

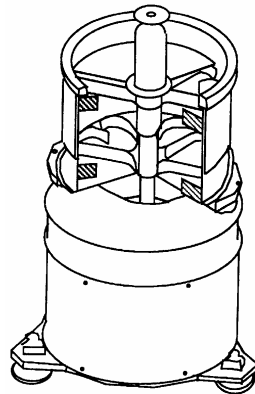


Figure 1.20 : BT-RHEOM [Hu, 1995]

Récemment, en France à Nantes (Banfill et al, 2000), tous les principaux rhéomètres à béton commercialement disponibles ont été réunis et pendant une semaine, 11 mélanges de béton ayant des propriétés rhéologiques différentes ont été produits et testés en même temps dans tous les rhéomètres. Les résultats de cette étude tendent à démontrer qu'il est possible de relier les résultats de tous les rhéomètres par un coefficient pour la viscosité plastique et un coefficient pour le seuil de cisaillement et ce pour chaque paire de rhéomètres. Peu importe lequel de ces rhéomètres mesure les « vraies » propriétés rhéologiques, il est toujours possible de comparer les résultats de l'un avec les autres et ainsi comparer les résultats de différentes études sur une même base.

Avec les équations suivantes, les mesures rhéologiques établies avec le rhéomètre IBB peuvent être converties en se basant sur la comparaison avec le rhéomètre du LCPC. Le Tableau 1.3 montre les données de transformations en unités fondamentales.

$$\tau_0 = aG + b \quad [ 1.12 ]$$

$$\mu = aH + b \quad [ 1.13 ]$$

Tableau 1.3 : Constantes de conversions des unités rhéologiques du rhéomètre IBB en unités fondamentales BT-RHEOM

	Conversion BT-RHEOM	
	$\tau_0$	$\mu$
a	155,3	13,2
b	504,3	-62,6

### 1.5.2 Essais tribologiques pour béton frais

La tribologie est la science qui étudie le frottement et l'usure ainsi que la lubrification entre deux systèmes. Pour le cas précis du pompage, lors de l'étude de l'interface ou du frottement entre le béton frais et la paroi du tuyau de pompage, on parlera des propriétés tribologiques du béton ou de la loi d'interface. Il existe peu d'essais tribologiques réalisables sur le béton frais et il n'en existe aucun qui soit normalisé. L'étude la plus récente sur les propriétés tribologiques du béton en relation avec la pompabilité a été réalisée par Kaplan (2000). Ce dernier a développé un tribomètre (Figure 1.21) utilisant le bâti du rhéomètre du LCPC et les résultats servaient à établir un modèle de prédiction bi-phase du pompage du béton pour un circuit fixe de 148 mètres, avec des boyaux de 125 mm de diamètre.



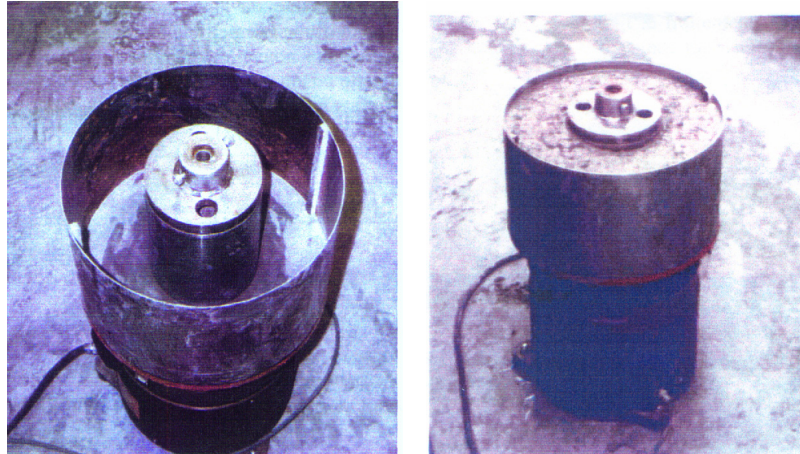


Figure 1.21 : Tribomètre à béton développé par Kaplan (2000)

Auparavant, Morinaga (1973) avait déjà développé un tribomètre basé sur des conditions réelles de pompage. La Figure 1.22 décrit l'appareil développé par cet auteur. Il s'agit d'un tube de 50 mm de diamètre sur 2 mètres de longueur placé sur un roulement. Du béton est placé à l'intérieur et est poussé par de l'air comprimé. Un capteur de force mesure la force nécessaire pour retenir le tuyau, donnant ainsi la contrainte de frottement généré entre béton et la paroi du tube. La friction ( $f$ ) le long de la paroi du boyau est décrite par :

$$f = k_1 + k_2 v \quad [ 1.14 ]$$

où :

- $k_1$  : coefficient d'adhésion;
- $k_2$  : coefficient de vitesse;
- $v$  : vitesse du béton.

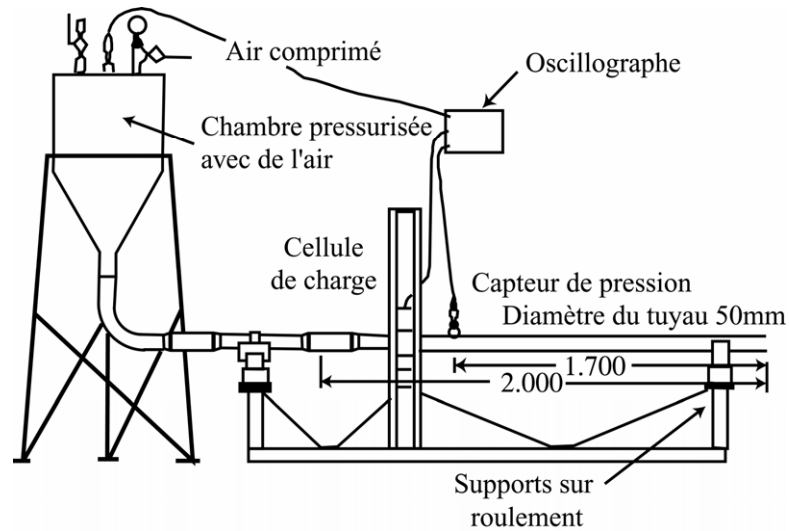


Figure 1.22 : Appareil de mesure de la friction développé par Morinaga (1973)

Best et Lane (1960) ont aussi développé un essai de type tribologique et validé cet essai avec un circuit de pompage utilisant des tuyaux de 150 mm de diamètre. Le montage de l'essai consiste en un cylindre hydraulique qui pousse le béton dans un cylindre de 250 mm de diamètre et à la fin de ce cylindre, le béton doit passer dans une réduction elliptique diminuant la section initiale de 16%. La vitesse du piston est de 25 mm/s. Cet essai ne mesure pas uniquement le frottement car une partie de l'énergie sert à comprimer le béton qui doit passer dans la réduction. Certains résultats obtenus par ces auteurs sont relativement importants :

- Une teneur en eau excessive provoque la ségrégation pendant le pompage et à l'inverse, une teneur en eau inférieure à un certain seuil provoque un frottement excessif;
- Pour un mélange granulaire donné, il existe une quantité de mortier minimale pour rendre ce béton pompable;
- La forme des gros granulats influence beaucoup la pression de pompage, surtout si la teneur en mortier est relativement faible;

- La taille du plus gros granulats n'a pas beaucoup d'influence sur les pressions de pompage à condition qu'il y ait assez de mortier pour enrober les gros granulats;
- Les cendres volantes permettent d'augmenter la compacité granulaire. À teneur en eau constante, le béton est plus maniable et facile à pomper.

Il existe peu de références sur la tribologie du béton frais. Cependant, celles disponibles laissent croire qu'à peu près tous les paramètres de formulation de la composition du mélange de béton influencent les propriétés de la couche lubrifiante. De plus, l'influence n'est pas quantifiée à savoir si l'influence d'un paramètre de composition augmente ou diminue, par exemple, la viscosité de l'interface.

## **1.6 Conclusion et besoins en recherche**

La prédiction du pompage a été étudiée sous plusieurs facettes. D'abord, les praticiens ont développé des abaques basés sur l'expérience en chantier. Ensuite, les chercheurs se sont basés sur les connaissances scientifiques pour développer différents essais qui permettent de déterminer la pompabilité du béton. Les chercheurs ont séparé leurs axes de recherche en deux sphères : les études sur la mobilité et les études sur la stabilité. Toutes les recherches ont un même but : prévenir et déterminer les causes de blocage lors des opérations de pompage que ce soit lors de l'amorçage, pendant le pompage ou lors des opérations de nettoyage.

Les études sur la stabilité ont porté sur la stabilité du réseau de bulles d'air lors du pompage, la ségrégation des granulats, la migration de l'eau sous un gradient de pression et les problèmes d'amorçage.

En parallèle, beaucoup d'études ont porté sur l'optimisation granulaire. Certains auteurs (Shilstone, 1990; DeLarrard 1999) proposent même des méthodes et logiciels qui permettent de prédire la rhéologie du béton en fonction de leurs paramètres de composition. Peu importe le type de problèmes rencontrés lors du pompage, le seul moyen de les régler est de modifier la composition du mélange de béton pour que ceux-ci répondent au critère

de stabilité et au critère de mobilité. La connaissance de la formulation des mélanges de béton est donc essentielle pour solutionner les problèmes reliés au pompage.

Les études sur la mobilité ont débutées en 1949 et jusqu'en 1994, les différents chercheurs se sont basés essentiellement sur la mesure de l'affaissement comme mesure de la maniabilité. Depuis l'apparition de rhéomètres mieux adaptés aux suspension granulaires, trois recherches (Beaupré, 1994, Chouinard, 1998, Kaplan, 2000) ont exploité les mesures rhéologiques pour prédire les pressions de pompage. Kaplan (2000) a montré que les propriétés tribologiques de l'interface acier béton étaient nécessaires pour prédire les pressions de pompage. Ces modèles n'ont pas été validés à grande échelle pour plusieurs configurations et plusieurs types de béton. Au mieux, Kaplan a vérifié son modèle prédictif sur deux chantiers mais sur des bétons tous similaires de type BHP ou à grande fluidité.

Suivant cette revue de la documentation, il est clair que seules les propriétés rhéologiques du béton ne peuvent servir à établir un modèle prédictif de la pression de pompage. Les propriétés de la couche lubrifiante formée en périphérie semblent être les plus importantes à mesurer et à incorporer à un modèle de prédiction de la friction. Le plus récent modèle basé sur les propriétés tribologiques et les propriétés rhéologiques (Kaplan, 2000) doit être validé avec des configurations différentes de boyau (diamètre plus petit, caoutchouc vs acier) et les différentes singularités (coudes et réducteurs) doivent être étudiés pour pouvoir décrire un modèle complet pour toute configuration de pompage. L'effet de la hauteur doit aussi être vérifié. De plus, certains liants contenant des ajouts minéraux doivent être étudiés puisqu'il semble que ces liants aient un effet bénéfique sur la pompabilité du béton.

## **Chapitre 2**

### **Développement des tribomètres**

La tribologie est la science traitant des propriétés des interfaces dont la friction et l'usure. Plus spécifiquement appliquée au pompage du béton, la tribologie est l'étude de la friction entre le béton frais et la paroi du boyau de pompage. Pour mesurer les contraintes de friction statique et friction dynamique entre le béton frais et une paroi d'acier ou de caoutchouc, un tribomètre à béton a été adapté au bâti du rhéomètre IBB.

Ce chapitre présente le développement des tribomètres. Le cahier des charges est présenté en premier lieu suivi de la présentation de la configuration retenue. Le développement mathématique permettant le passage aux unités fondamentales en fonction des propriétés géométriques est présenté. Finalement, des résultats montrant la différence en une paroi d'acier et une paroi en caoutchouc sont présentés.

## 2.1 Cahier des charges et configuration retenue

L'essai tribologique implique la mesure de la vitesse et du couple sur une pièce tournante. Le bâti du rhéomètre IBB est tout indiqué pour cette tâche. Le premier critère de conception du tribomètre est donc qu'il soit adaptable facilement et rapidement au bâti du rhéomètre IBB.

La configuration doit être telle que le passage aux unités fondamentales soit possible par des équations simples et directes. Une configuration cylindrique est donc retenue.

Le troisième critère est de pouvoir étudier différents types de surface. Un tribomètre à surface de caoutchouc a donc été fabriqué ainsi qu'un autre, de même géométrie, avec une surface d'acier.

Un bol de même dimension que celui du rhéomètre IBB a été utilisé. Des pales fixes de 12 mm de largeur ont été placées sur les parois internes du bol, au fond de celui-ci et en porte-à-faux dans le centre du bol pour que le béton frais ne soit pas en mouvement. La Figure 2.1 montre un schéma du bol ainsi que de la partie mobile (cylindre creux) du tribomètre.

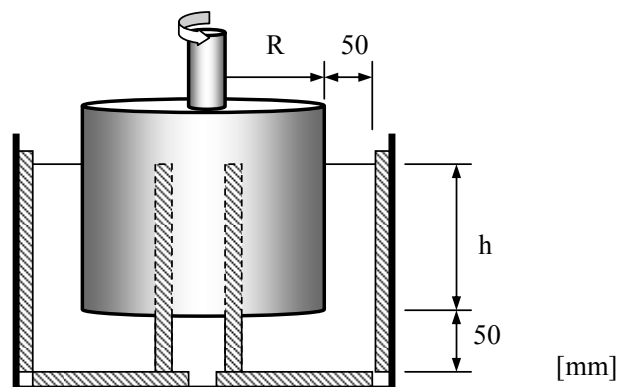


Figure 2.1 : Croquis du tribomètre



Figure 2.2 : Photos du tribomètre : à gauche, vue générale avec tribomètre en caoutchouc et à droite, vue de près avec tribomètre en acier en mouvement.

## 2.2 Hypothèses de base

Le comportement rhéologique du béton est généralement de type Binghamien. Pour un fluide homogène, la distribution de la vitesse lors de l'écoulement dans un boyau peut être schématisée telle que montrée à la Figure 2.3. Cette figure présente, pour un fluide homogène Newtonien, une distribution de vitesse parabolique. Pour le fluide Binghamien, pour qu'il y ait écoulement, il faut que les contraintes soient supérieures au seuil de cisaillement. Les contraintes près de la paroi sont les plus élevées et lorsqu'elles sont supérieures au seuil de cisaillement du fluide il y a écoulement. À partir d'une certaine distance de la paroi, les contraintes deviennent inférieures au seuil de cisaillement et il n'y a plus d'écoulement dans cette portion appelée noyau ou bloc.

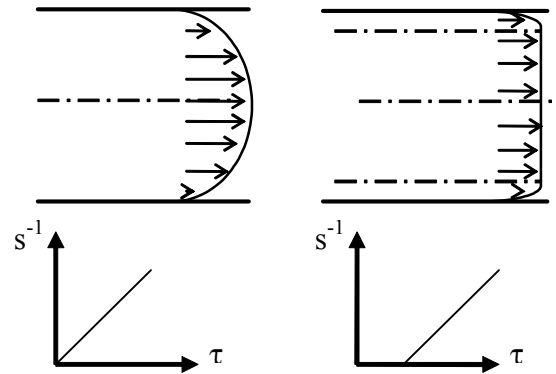


Figure 2.3 : Profil de vitesse en conduite pour un fluide homogène Newtonien (à gauche) et pour un fluide homogène Binghamien (à droite)

Cependant, le béton n'est pas homogène dans une conduite lors du pompage. Une couche de lubrification composée de la pâte et d'une partie des particules fines provenant des granulats est formée en périphérie (voir Figure 2.4). Le béton au centre est appauvri en pâte (donc plus riche en granulats) et ce sont les propriétés rhéologiques de la couche lubrifiante (ou propriétés tribologiques de l'interface) et celles du béton qui régissent le profil d'écoulement en conduite.

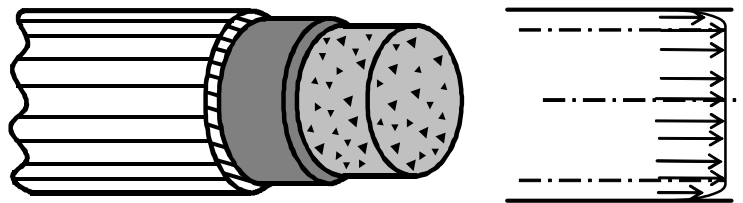


Figure 2.4 : Profil de vitesse en conduite pour le béton

Ainsi le profil de vitesse d'écoulement du béton en conduite peut paraître semblable à celui d'un fluide Binghamien homogène mais il n'est pas du aux mêmes phénomènes. Pour le béton, c'est la pâte en périphérie qui lubrifie les parois qui provoquent l'écoulement du béton et non le fait que les contraintes aux parois dépassent le seuil de cisaillement du béton (comme c'est le cas pour un fluide homogène). On remarque d'ailleurs sur le profil de vitesse présenté à la Figure 2.4 qu'il y a du glissement en périphérie. Aussi, si les



contraintes de cisaillement sont supérieures au seuil de cisaillement du béton, il y a alors déformation partielle du noyau composé du béton et plus au centre les contraintes étant inférieures au seuil, le béton s'écoule en bloc.

Lors de la réalisation d'un essai tribologique, les hypothèses suivantes sont posées :

- Les propriétés de la couche limite ou lubrifiante formée par le mouvement du tribomètre sont les mêmes que celles formées lors du pompage dans un boyau;
- L'épaisseur de la couche lubrifiante est identique dans le boyau et en périphérie du tribomètre;
- L'effet de la pression sur le volume d'air est négligeable et les propriétés rhéologiques et tribologiques sont peu affectées. (Ce concept sera discuté à la section 4.6).

### 2.3 Protocole d'essai tribologique

La séquence des vitesses angulaires imposées pour l'essai tribologique est la même que pour l'essai rhéologique. La vitesse du tribomètre est augmentée graduellement jusqu'à environ 1 tour/seconde, en plusieurs paliers d'une durée de 10 secondes. Par la suite, la vitesse du cylindre est diminuée progressivement, toujours par palier, jusqu'à l'arrêt complet. C'est lors du ralentissement que les données de couple et de la vitesse sont utilisées pour calculer le seuil de l'interface ( $G_i$ ) et la viscosité d'interface ( $H_i$ ) en unités machine. La Figure 2.5 montre les divers paliers de vitesse utilisés lors de l'essai. Sur chacun des paliers plusieurs lectures de la vitesse et du couple sont réalisées et une moyenne est calculée. Les données sont placées en graphique pour l'interprétation de l'essai (Figure 2.6). Seule la portion des mesures prises lors du ralentissement sont considérées puisqu'à ce moment la formation du film de pâte est réalisée et une régression linéaire est appliquée.

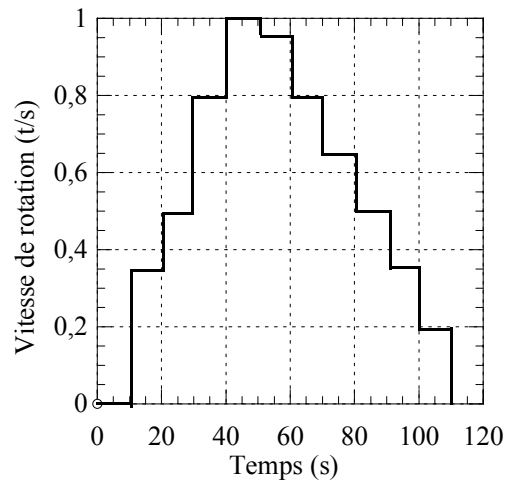


Figure 2.5 : Schématisation du protocole d'essai utilisé pour l'essai tribologique

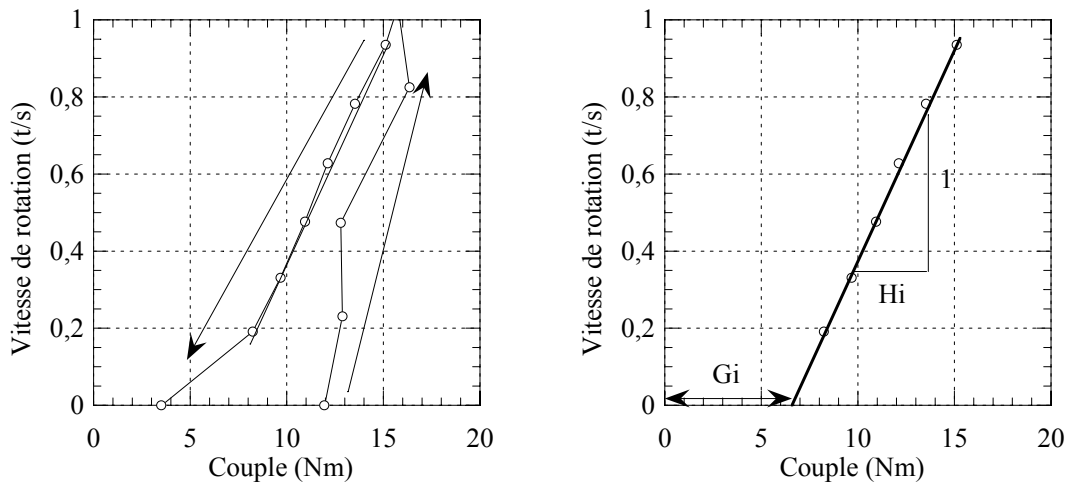


Figure 2.6 : a) Exemple de résultat obtenu avec l'essai tribologique; b) paramètres tribologiques schématisés graphiquement

Lorsque l'essai tribologique est terminé le résultat des calculs réalisés par le système de contrôle de l'appareil se présente en unités brutes (Nm et Nm.s) qui se combinent par une expression ayant la forme suivante:

$$T = G_i + H_i V_{\text{rot}} \quad [ 2.1 ]$$

Où :

- T : couple en Nm ;
- $G_i$  : seuil de l'interface en Nm ;
- $H_i$  : viscosité plastique de l'interface en Nms ;
- $V_{\text{rot}}$  : vitesse de rotation en Tour/s.

## 2.4 Calcul des contraintes sur les parois du tribomètre

Le but du développement mathématique qui suit est d'utiliser les résultats tribologiques pour décrire la contrainte à la surface du tuyau de pompage afin d'obtenir un résultat directement en Pa. On cherche donc/ à transformer les résultats en unités brutes pour obtenir une équation de la forme :

$$\tau_{\text{surface}} = \tau_{oi} + \eta_i \cdot V \quad [ 2.2 ]$$

- Où :
- $\tau_{\text{surface}}$  : contrainte tangentielle ou friction (Pa);
  - V : la vitesse (m/s) ;
  - $\tau_{oi}$  : le seuil de cisaillement de l'interface (Pa);
  - $\eta_i$  : est la viscosité d'interface (Pa.s/m).

La contrainte tangentielle aux surfaces (ou friction) est égale au couple divisé par le rayon divisée par la surface :

$$\tau_{\text{surface}} = \frac{C}{R \cdot 2\pi R \cdot 2h} \quad (\text{en Pa.}) \quad [ 2.3 ]$$

- Où :
- R : le rayon moyen du cylindre tribologique (m);
  - C : le couple mesuré (Nm).

$h$  : la hauteur du cylindre immergée dans le béton (x2 faces du cylindre.).

La vitesse tangentielle à la paroi du tribomètre est égale à :

$$V = \Omega \cdot R \quad [ 2.4 ]$$

où :

$V$  = vitesse tangentielle (m/s);

$\Omega$  = vitesse angulaire (rad/s) ;

$R$  = rayon moyen du tribomètre.

Avec :

$$\Omega = V_{rot} \cdot 2\pi \text{ en rad/s.} \quad [ 2.5 ]$$

où :  $V_{rot}$  est la vitesse en t/s

Alors :

$$V = V_{rot} \cdot 2\pi \cdot R \text{ en m/s.} \quad [ 2.6 ]$$

Le seuil d'interface en unité fondamentales ( $\tau_{oi}$ ) donne :

$$\tau_{oi} = \frac{G_i}{2 \cdot 2\pi R^2 h} \quad [ 2.7 ]$$

La viscosité d'interface en unité fondamentale ( $\eta_i$ ) donne :

$$\eta_i = \frac{d\tau}{dv} = \frac{dc / 4\pi R^2 h}{dv \cdot 2\pi R} \quad [ 2.8 ]$$

$$\eta_i = \frac{dc}{dv} \cdot \frac{1}{4\pi R^2 h \cdot 2\pi R} \quad [ 2.9 ]$$

$$\eta_i = \frac{H_i}{8\pi^2 R^3 h} \quad [ 2.10 ]$$

En intégrant [ 2.7 ] et [ 2.10 ] dans [ 2.2 ], on obtient :

$$\tau_{surface} = \frac{G_i}{4\pi R^2 h} + \frac{H_i}{8\pi^2 R^3 h} \cdot V \quad [ 2.11 ]$$

Il faut aussi considérer le cas où la vitesse de rotation est suffisamment élevée pour que le béton soit cisailé. La vitesse de rotation est alors égale à la somme de la vitesse de glissement et de la vitesse du béton au voisinage du cylindre.

En considérant une paroi du cylindre et en considérant le béton comme un fluide binghamien, la vitesse angulaire du béton  $\Omega_{bét}$  (HU, 1995 cité par Kaplan 2000) :

$$\Omega_{bét} = \frac{1}{2\mu} \left[ \frac{T_{tot}}{2\pi R^2 h} - \tau_0 \left( 1 + \ln \frac{T_{tot}}{2\pi R^2 h \tau_0} \right) \right] \quad [ 2.12 ]$$

Où  $T_{tot}$  est le couple total.

Normalement, il faudrait toujours calculer en fonction de ce dernier cas. Kaplan (2000) mentionne que dans le cas où il n'y a pas de cisaillement dans le béton, l'équation n'a plus de sens physique et on trouve des vitesses de rotation négative. Dans ce cas, il suffit d'utiliser les équations qui ne tiennent pas compte du cisaillement dans le béton.

L'Annexe A présente toutes les courbes tribologiques. Pour tous les mélanges (sauf ceux avec air entraîné) les relations sont linéaires. Ceci montre en fait que la vitesse n'est jamais assez élevée pour cisailier de façon significative le béton. Si du cisaillement dans le béton survenait, il y aurait une cassure sur la relation à partir d'une certaine vitesse de rotation.

## 2.5 Différence entre les mesures réalisées au tribomètre à paroi en acier et celui à paroi en caoutchouc

Une série d'essais préliminaire a été réalisée lors du développement des tribomètres et la version en acier et la version en caoutchouc ont été comparées. Les formulations de ces mélanges de béton sont présentées en Annexe B. La Figure 2.7 présente la comparaison entre les paramètres d'interface mesurés avec le tribomètre en caoutchouc et celui en acier. Les relations montrent une différence d'environ 76% entre le seuil mesuré avec le tribomètre en acier ( $\tau_{0ia}$ ) et celui en caoutchouc ( $\tau_{0ic}$ ) et une différence d'environ 80% entre la viscosité d'interface mesurée avec le tribomètre en acier ( $\eta_{ia}$ ) et celui en caoutchouc ( $\eta_{ic}$ ). Une paroi de caoutchouc offre donc plus de résistance à l'écoulement. Ce qui est en accord avec les observations des professionnels du pompage.

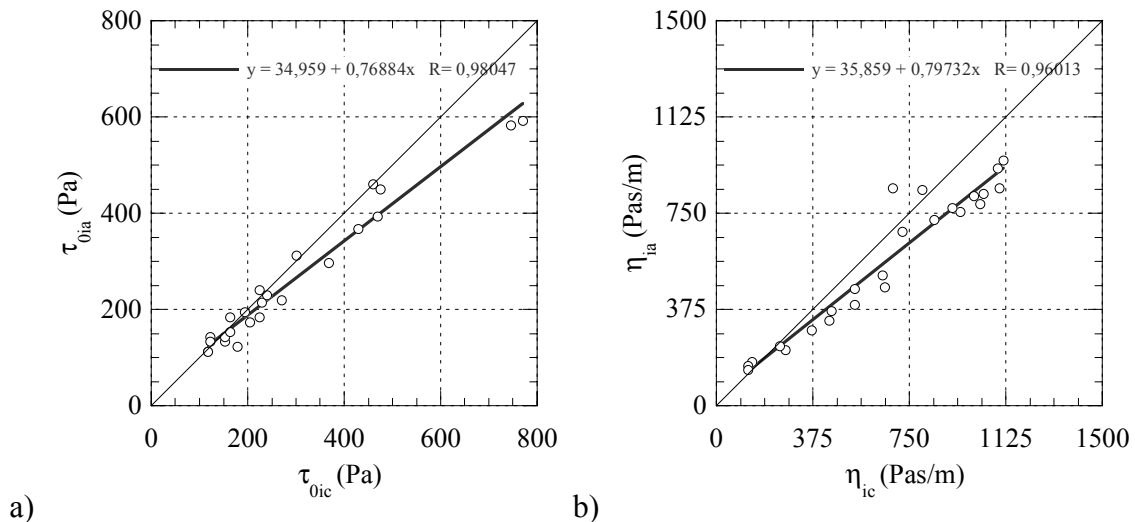


Figure 2.7 : Relation entre les paramètres tribologiques mesurés avec le tribomètre en caoutchouc et celui en acier

## **Chapitre 3**

### **Description des circuits de pompage et de l'instrumentation**

Ce chapitre présente les équipements utilisés pour réaliser l'étude de laboratoire. Les différents essais réalisés sur béton frais et durci sont présentés en premier lieu. Les deux circuits de pompage expérimentaux, l'un en laboratoire et l'autre en chantier, ainsi que l'équipement reliés au pompage sont décrits par la suite. Le système de capteurs de pression utilisé pour les deux circuits de pompage et le système d'acquisition de données sont aussi décrits et leur fonctionnement expliqué.

Une courbe typique de la mesure de la pression pendant le pompage est présentée et les différents paramètres qui peuvent en être extraits sont définis. Une méthode permettant de prédire le coefficient de remplissage à partir de la courbe de pression est discutée.

### 3.1 Essais normalisés réalisés sur le béton

Les essais sur béton frais traditionnels ont été réalisés sur tous les mélanges de béton en laboratoire et en chantier.

Les essais présentés au Tableau 3.1 ont été réalisés aux différents stades de l'étude.

Tableau 3.1 : Essais réalisés sur les bétons

<b>Essais sur béton frais</b>	<b>Norme</b>
Affaissement au cône	ASTM-C143
Masse volumique	ASTM-C138
Teneur en air	ASTM-C231
<b>Essais sur béton durci et granulats</b>	
Résistance à la compression	ASTM-C39
Réseau de bulles d'air	ASTM C457
Granulométrie sur les granulats retenus sur le tamis no 200 (75 $\mu\text{m}$ ) par lavage du béton frais.	Méthode adaptée

### 3.2 Fabrication du béton

Les gâchées de béton fabriquées en laboratoire ont toutes été réalisées selon le même protocole. Un malaxeur à mouvement planétaire d'une capacité de 300 litres a été utilisé lors des essais de pompage et un malaxeur planétaire d'une capacité de 80 litres a été utilisé lors des essais de convenance.



Le sable et la pierre ont été malaxés pour être homogénéisés et ensuite, la teneur en eau a été prise pour compenser la quantité d'eau à ajouter au mélange de béton. Par la suite, les matériaux secs (sable, pierre et liant) étaient introduits dans le malaxeur en premier et malaxés. L'eau de gâchage était ajoutée. Pour les mélanges où il y avait présence d'agent entraîneur d'air, celui-ci était introduit préalablement dans une portion séparée de l'eau de gâchage pour être introduit dans le mélange de béton après l'eau de gâchage. Le superplastifiant était ajouté en dernier avant le malaxage principal, pour obtenir l'affaissement au cône visé. Le béton était laissé au repos dans le malaxeur 10 minutes, pour être malaxé une dernière période de 2 minutes avant la réalisation des essais d'affaissement, de masse volumique et de teneur en air. Lorsque l'affaissement n'était pas satisfaisant, une quantité supplémentaire de superplastifiant était ajoutée au mélange. Lorsque le mélange rencontrait les exigences en terme d'affaissement, les autres essais sur béton frais étaient réalisés.

### **3.3 Essai rhéologique**

L'essai rhéologique a été réalisé sur tous les mélanges. Le rhéomètre IBB avec un agitateur en H à mouvement planétaire a été utilisé avec la séquence normale d'essai. Lors des essais de pompage, l'essai rhéologique a été réalisé en premier, suivi des essais tribologiques. Pour les essais de chantier, une version portable du rhéomètre IBB a été utilisée. Le système de mesure, l'agitateur ainsi que le volume d'échantillon sont les mêmes que pour la version non portable. La Figure 3.1 montre la version originale du rhéomètre IBB ainsi que la version portable.



Figure 3.1 : Rhéomètre IBB. À gauche la version originale et à droite la version portable

### 3.4 Essais tribologiques

Deux tribomètres à cylindres coaxiaux ont été développés. L'un à surface de caoutchouc et l'autre à surface d'acier. Le Chapitre 2 décrit en détail le développement de l'essai. Pour chaque mélange de béton, les essais au tribomètre en caoutchouc et en acier ont été réalisés. L'essai au tribomètre en caoutchouc a toujours été réalisé en premier, suivi de l'essai avec le tribomètre en acier. La Figure 3.2 montre une photo du tribomètre développé pour ce projet.



Figure 3.2 : Photos du tribomètre. À gauche, vue générale du tribomètre en caoutchouc et à droite, vue de près du tribomètre en acier.

Les résultats obtenus avec les tribomètres servent à déterminer la friction entre le béton frais et une paroi de caoutchouc ou d'acier. Le bâti du rhéomètre IBB est utilisé pour réaliser l'essai et les résultats sont le seuil de l'interface et la viscosité de l'interface. Puisque l'automate du rhéomètre IBB calcule automatiquement une régression linéaire en unités brutes (des Nm pour le couple, et des tours/s pour la vitesse), une relation qui est fonction des propriétés géométriques du tribomètre est requise pour obtenir des unités fondamentales (voir Chapitre 2).

## 3.5 Installation de pompage en laboratoire

### 3.5.1 Description de la pompe à béton

La pompe utilisée en laboratoire est de faible débit et montée sur une remorque (Figure 3). Elle est fabriquée par la compagnie Schwing (modèle BPA-450). Ce type de pompe est couramment utilisé en chantier pour des travaux de béton projeté par voie humide ou pour de petits chantiers. Cette pompe peut fournir un débit maximum d'environ 15 m<sup>3</sup>/h. C'est une pompe à deux cylindres de refoulement et le système RockValve™ de Schwing est utilisé pour assurer un débit presque constant. Le Tableau 3.2 présente les caractéristiques résumées de cette pompe. La fiche technique complète est présentée à l'Annexe C.



Figure 3.3 : Photo de la pompe de laboratoire

Tableau 3.2 : Caractéristiques rapportées par le fabricant de la pompe à béton utilisée en laboratoire

Débit maximum (m <sup>3</sup> /h)	26
Pression maximale sur le béton (psi/kPa)	1100 / 7580
Diamètre des cylindres de refoulement (mm)	100
Longueur des cylindres de refoulement (mm)	1000

### 3.5.2 Description du circuit de pompage en laboratoire

La pompe Schwing, modèle BPA-450 décrite précédemment a été utilisée en laboratoire pour réaliser les essais de pompage. Le circuit de pompage comportait un coude à 90 degrés à la sortie de la pompe, un réducteur passant de 100 mm à 50 mm sur une longueur de 1,63 m et de 15,24 mètres (50 pi) de boyaux souple en caoutchouc de 50 mm (2 po) de diamètre.

Deux capteurs de pressions, l'un placé tout juste en amont du réducteur et l'autre en aval du réducteur, branchés à un système d'acquisition de données mesuraient en continu les pressions de pompage durant l'essai. Le boyau souple était placé sur le sol en forme de grand cercle. La sortie du boyau de pompage était placée dans la trémie de la pompe pour injecter à nouveau le béton dans le circuit. La Figure 3.4 illustre le circuit de pompage.

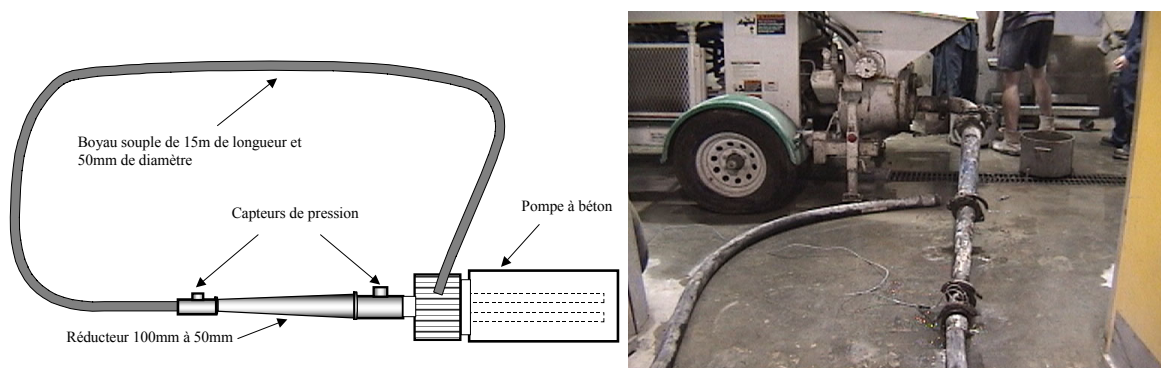


Figure 3.4 : Schéma du circuit de pompage

### 3.5.3 Description de l'installation des capteurs de pression

Des capteurs de pression à membrane ont été utilisés pour mesurer les pressions de pompage. La fiche technique complète des capteurs de pressions est à l'Annexe D. Les capteurs de pression sont montés dans un support qui permet de placer le capteur de façon tangente à la paroi intérieure de la tuyauterie de pompage. La Figure 3.5 montre une photo d'un capteur de pression seul (à gauche) et monté dans son support (à droite). Les capteurs sont reliés à une carte d'acquisition de données de marque InstruNet. Le logiciel DasyLab a été utilisé pour l'acquisition des données.

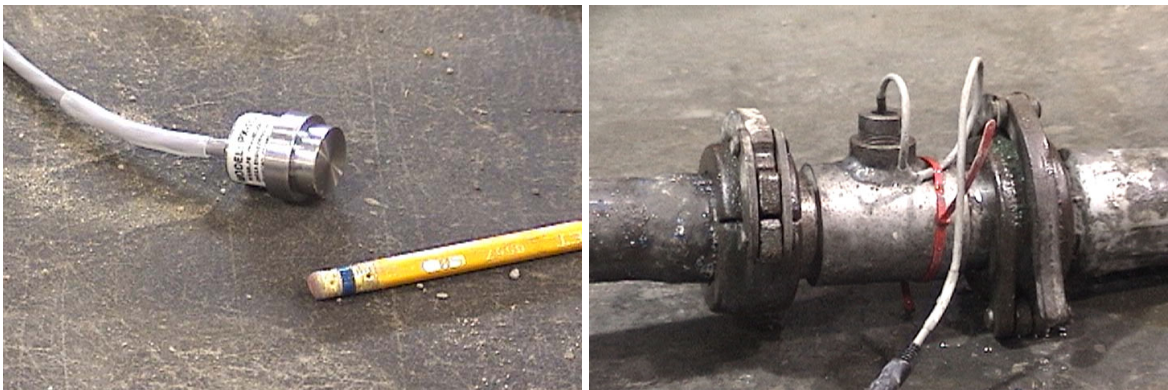


Figure 3.5 : Capteur de pression à membrane (à gauche) et photo du capteur monté dans son support (à droite)

### 3.5.4 Étalonnage des capteurs de pression utilisés en laboratoire

L'étalonnage des capteurs de pression est nécessaire pour déterminer la correspondance entre la lecture du capteur par le système d'acquisition de données (volts) et les unités de pression appliquée (Psi, kPa ou Bar). Un appareil à piston convertissant une pression d'air en pression d'eau a été utilisé pour appliquer une pression sur la membrane des capteurs. Pour différentes pressions d'eau, les lectures correspondantes en volts étaient enregistrées.

Un capteur étalon indiquait la pression réelle appliquée sur l'eau. La Figure 3.6 montre le montage utilisé pour étalonner les capteurs de pression.



Figure 3.6 : Montage utilisé pour l'étalonnage des capteurs de pression en laboratoire

La Figure 3.7 montre les relations d'étalonnage pour les capteurs de pression entre les volts lus et les pressions en unités psi. Tous les capteurs montrent une relation linéaire et la pente est utilisée pour la calibration, une seule constante est utile soit la pente. Le décalage observé dépend par la suite du serrage de l'écrou de blocage sur le montage. La mise à zéro est réalisée au début de chacun des essais de pompage. Le Tableau 3.3 résume les constantes d'étalonnage utilisées pour les capteurs de laboratoire.

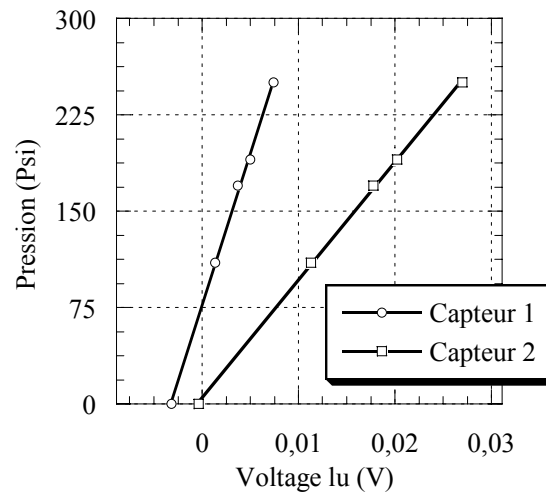


Figure 3.7 : Courbes d'étalonnage des capteurs utilisés en laboratoire

Tableau 3.3 : Constantes d'étalonnage des capteurs utilisés sur le circuit de laboratoire

No de capteur (max psi)	Constante de calibration (psi/volts)
Capteur 1 (500 Psi)	2099,5
Capteur 2 (2000 Psi)	8128,5

## 3.6 Installation de pompage en chantier

### 3.6.1 Description de la pompe à béton de chantier

La pompe à béton utilisée en chantier est une pompe à grand débit de la compagnie Schwing montée sur un camion (Voir Figure 3.8). La fiche détaillée de cette pompe est présentée à l'Annexe E. Une flèche articulée pouvant atteindre une longueur maximale de 42 m permet d'acheminer le béton à l'endroit désiré. Cette pompe possède deux pistons et une valve de déviation (RockValve™) achemine de façon alternative le béton dans les pistons de refoulement. Ces pistons ont un diamètre de 229 mm (9 po) et une longueur de 2007 mm (79 po). Le rythme des pistons est réglé par l'opérateur de la pompe en fonction

du débit souhaité et des conditions de chantier. Le Tableau 3.4 présente un résumé des caractéristiques de la pompe de chantier.



Figure 3.8 : Photo de la pompe à béton de chantier

Tableau 3.4 : Caractéristiques rapportées par le fabricant de la pompe à béton utilisée en chantier

Débit maximum (m <sup>3</sup> /h)	170
Pression maximale sur le béton (psi/kPa)	1007 / 6940
Diamètre des cylindres de refoulement (mm)	229
Longueur des cylindres de refoulement (mm)	2007

### 3.6.2 Position des capteurs de pression

Un camion pompe muni d'une flèche de 42 mètres a été instrumenté avec cinq capteurs de pression. La Figure 3.9 montre la position des capteurs le long de la flèche. Ces capteurs ont été placés de façon stratégique de façon à mesurer des pertes de charges sur une section droite (capteurs 2 et 3) et sur une série de 4 coudes (capteurs 3 et 4). Le capteur 1 placé à la sortie de la pompe et au début de la ligne de pompage permet de mesurer la perte de charge



totale sur le circuit. Le capteur 5 placé à la toute fin de la flèche mesure la pression à cet endroit lorsque d'autres boyaux sont ajoutés à la fin de la flèche. Si aucun autre boyau n'est ajouté à la fin de la flèche, la pression est considérée nulle. En effet, lorsque la flèche est utilisée seule (pratiquement une majorité des cas en chantier) ce capteur de pression mesure une pression pratiquement nulle.

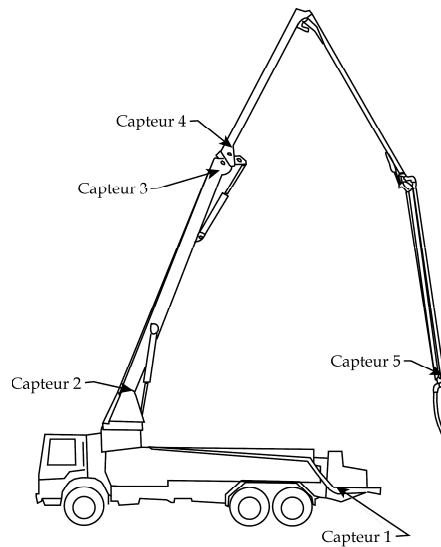


Figure 3.9 : Schéma illustrant la position des capteurs sur le camion pompe

De façon schématique, en illustrant les coudes de façon linéaire, le circuit de pompage de chantier est illustré à la Figure 3.10.

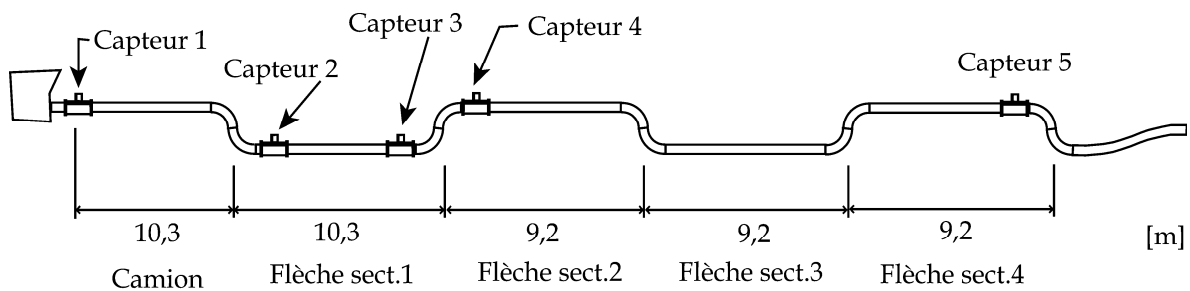


Figure 3.10 : Schéma de la flèche rapportée de façon linéaire montrant la position des capteurs de pression

### 3.6.3 Installation des capteurs de pression

Pour installer les capteurs de pression, un trou a été percé sur la paroi du boyau de pompage et une bague filetée de 25mm (1po) de diamètre a été soudée (voir Figure 3.11). Un capteur de pression de type diaphragme monté dans un petit assemblage est inséré et fixé dans la bague filetée. Tous les câbles sont dirigés dans la cabine du camion-pompe où sont placés l'ordinateur et la carte d'acquisition de données. Pendant les périodes de pompage où il n'y a pas de mesures prises, un bouchon de la forme d'un capteur de pression est installé pour éviter l'usure excessive des capteurs de pression (Figure 3.11)

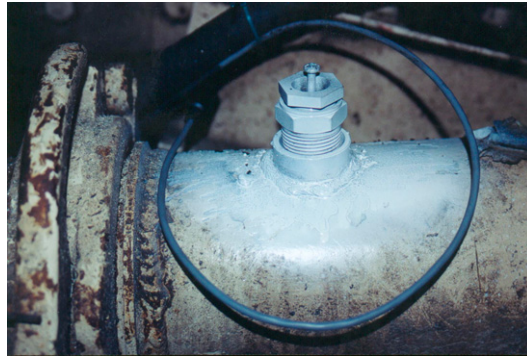


Figure 3.11 : Assemblage sur un boyau du camion-pompe d'un capteur de pression. Sur la photo, un faux capteur est installé.

### 3.6.4 Étalonnage des capteurs de pression

L'étalonnage des capteurs de pression a été réalisé en place sur la flèche. Pour réaliser la première lecture, les boyaux étaient vides, à 0 psi. Par la suite, la conduite de pompage a été bloquée à une extrémité par un bouchon étanche puis remplie d'eau. Une première lecture de pression a été réalisée à 80 psi et une deuxième lecture à 105 psi, en appliquant une pression avec de l'air comprimé sur l'eau dans la conduite. Le Tableau 3.5 présente les données d'étalonnage recueillies. La Figure 3.12 présente les courbes d'étalonnage obtenues.

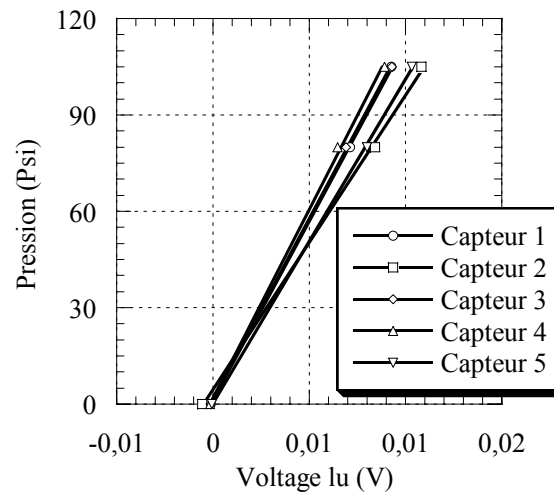


Figure 3.12 : Étalonnage des capteurs de pression installé sur le camion pompe

Tableau 3.5 : Constantes d'étalonnage des capteurs utilisés sur la flèche du camion-pompe

No de capteur	Constante de calibration (psi/volts)
Capteur 1	11133,3
Capteur 2	9142,6
Capteur 3	11208,6
Capteur 4	11716,8
Capteur 5	10067,4

### 3.7 Formes typiques d'une courbe de pression mesurée

Avec un capteur de pression placé directement sur la ligne de pompage, la pression appliquée directement sur le béton a été enregistrée à plusieurs endroits. La fréquence d'acquisition doit d'être d'au moins 10Hz pour obtenir une résolution satisfaisante de la courbe de pression. La Figure 3.13 montre une courbe typique obtenue lors des opérations

de pompage de béton. À chaque poussée de piston, le béton est mis en mouvement et les montées en pression sont observées. Pour chacun de ces coups de piston, un plateau de pression constante est observé et entre chaque coup de piston, lors du balancement de la valve de déviation dans la pompe, une période morte est aussi observée sur le graphique des pressions de pompage. Le temps effectif ( $t_{\text{eff}}$ ) correspond à la longueur d'un plateau de pression. Ce temps effectif correspond au temps pendant lequel le béton est réellement en mouvement dans les boyaux. Le temps moyen ( $t_{\text{moy}}$ ) est la période d'un cycle i.e. le temps du début de la poussée du cylindre jusqu'au début de la poussée du cylindre suivant.

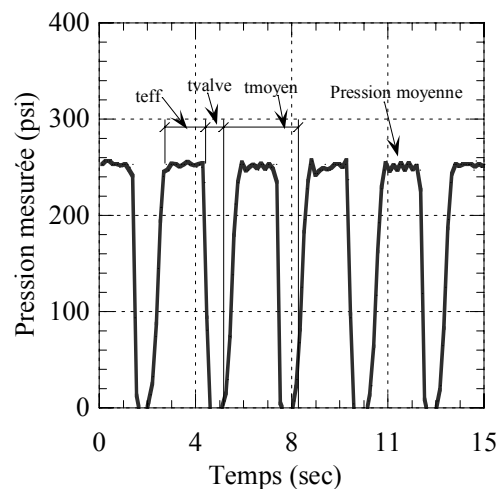


Figure 3.13 : Courbe typique de pressions de pompage

Pour certains mélanges de béton, le plateau est plus court et ce même si la période ou vitesse des pistons de la pompe est la même. Cela signifie que le béton a été en écoulement sur une plus petite période de temps puisqu'il y a écoulement seulement sur le temps représenté par le plateau. La longueur du plateau est fonction du volume sans air de béton aspiré par le piston de refoulement. Le coefficient de remplissage peut être représenté par le volume réellement aspiré par le piston divisé par le volume total du piston. Des coefficients de remplissage entre 0,70 et 0,90 sont rencontrés en pratique.

La pompe utilisée, une Schwing BPA-450, comporte deux cylindres de refoulement. Leur diamètre intérieur est de 100 mm et la longueur de refoulement est de 1000 mm. Le volume

théorique maximal de béton qui peut être refoulé par un cylindre (soit un coefficient de remplissage égal à un) est le volume de ce cylindre qui est de 7,85 litres.

Lors du changement de piston, la valve de déviation doit changer de position. Pendant ce temps ( $t_{\text{valve}}$ ), il n'y a pas d'écoulement de béton. Afin de mieux caractériser le débit effectif par rapport au débit moyen, le temps nécessaire au déplacement de la valve de déviation a été mesuré pour 4 cadences de piston différentes. Une caméra vidéo a capté les images de la valve tous les  $1/30^{\text{ième}}$  de seconde. En observant les images numérotées, les temps de départ et d'arrivée de la valve, à gauche et à droite ont été mesurés.

La Figure 3.14 montre bien que le temps varie légèrement en fonction de la vitesse de cadence, mais de façon pratique, le temps de déplacement est considéré constant soit 0,5 seconde. La Figure 3.14 montre sur le deuxième axe, le pourcentage de la période de cadence qui est utilisé pour le déplacement de la valve. Pour une période faible, donc un débit rapide de pompage, la proportion du temps de déplacement de la valve est très important et est responsable en partie de la perte d'efficacité relative du pompage.

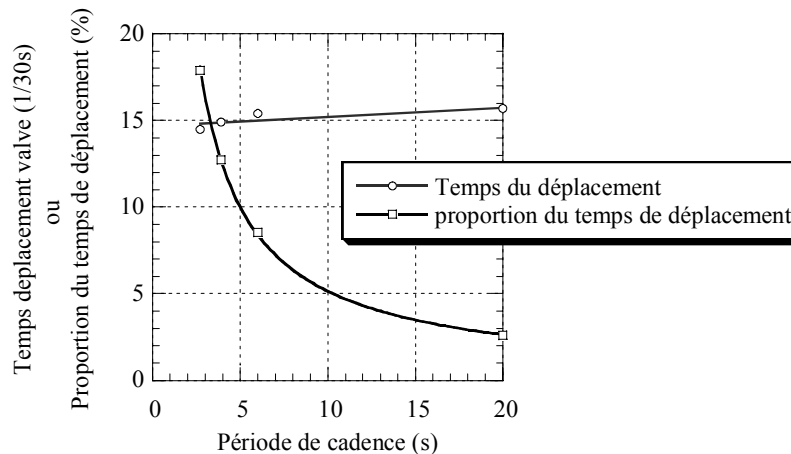


Figure 3.14 : Temps de déplacement de la valve de déviation par rapport à la période de cadence des pistons

### 3.8 Prédiction du coefficient de remplissage à partir de la courbe de pression de pompage

En observant une courbe de pression typique le  $t_{eff}$  est le temps pendant lequel s'écoule du béton. Une période d'arrêt est enregistrée, elle correspond au temps où la valve de déviation change de cylindre de refoulement. Ce temps a été défini comme étant fixe et égal à 0,5 seconde. Après le temps d'arrêt, il y a le temps de montée en pression. Pendant ce temps, le cylindre pousse sur le béton et l'air aspiré dans du piston lors de la phase d'aspiration.

On peut alors définir un coefficient d'efficacité calculé à partir de la courbe des pressions de pompage :

$$K_{eff} = \frac{T_{eff}}{T_{moy} - T_{valve}} \quad [ 3.1 ]$$

où :

- $K_{eff}$  : coefficient d'efficacité calculé;
- $T_{eff}$  : temps effectif (sec);
- $T_{moy}$  : temps moyen (sec);
- $T_{valve}$  : temps de déviation de la valve (1/2 sec).

Pour vérifier l'hypothèse que le volume sans air de béton aspiré par les cylindres de refoulement peut être prédit par le coefficient d'efficacité déterminé à partir des courbes de pression de pompage, pour différents mélanges de béton, les masses effectivement pompées par chacun des coups de piston ont été mesurées. Pour chacun des mélanges de béton, connaissant la masse volumique et la teneur en air, le volume réel sans air pompé par coup de piston a été calculé. Ce volume réel de béton divisé par la capacité d'un cylindre de refoulement donne le coefficient de remplissage réel mesuré. En comparant le coefficient réellement mesuré à celui calculé à partir des courbes de pression, il est possible de valider cette hypothèse.

La Figure 3.15 présente deux relations. Pour un mélange de béton pompé à différents débits, le coefficient de remplissage prédit ( $K_{eff}$ ) a été calculé. À la Figure 3.15a, pour chacun des débits de pompage, on remarque un coefficient de remplissage différent. Plus le débit augmente et plus le coefficient de remplissage diminue. La Figure 3.15b montre une comparaison des coefficients de remplissage mesurés et prédit ( $K_{eff}$ ) pour un mélange de béton. La mesure du coefficient de remplissage à partir des données de pression ( $K_{eff}$ ) semble correspondre au coefficient de remplissage réellement mesuré.

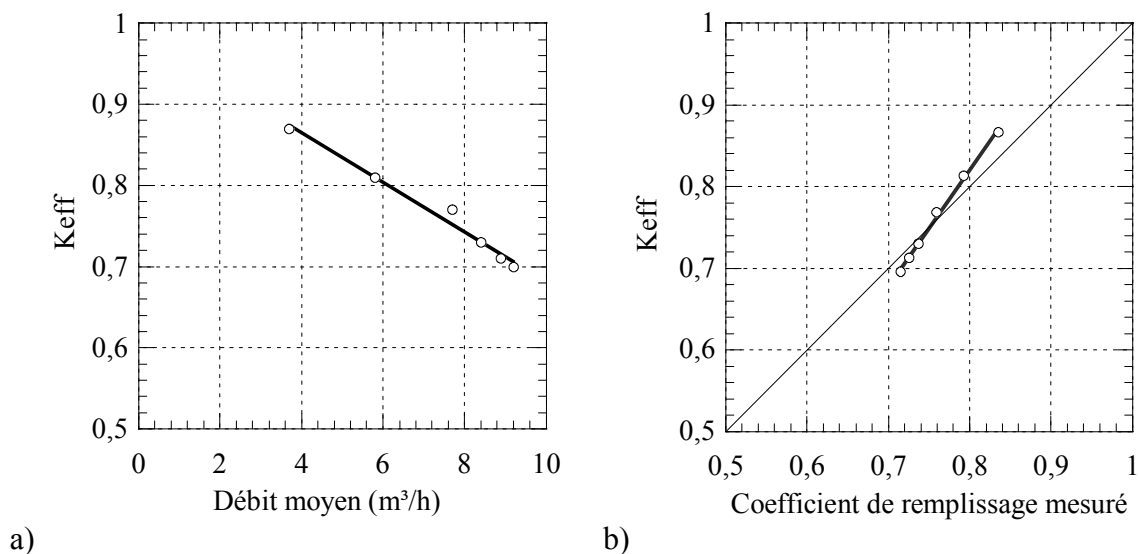


Figure 3.15 : a) Variation du coefficient de remplissage prédit ( $K_{eff}$ ) en fonction du débit de pompage. b) Comparaison du coefficient de remplissage prédit ( $K_{eff}$ ) et du coefficient de remplissage mesuré pour un mélange (SF-1-500)

La Figure 3.16 montre la relation entre les coefficients de remplissage mesurés et prédit ( $K_{eff}$ ) pour tous les mélanges de béton pompés lors de la campagne en laboratoire. Le coefficient de remplissage varie donc entre 0,7 et 0,9 environ. La dispersion importante entre la valeur prédite et celle mesurée est due à plusieurs facteurs. En ordre d'importance, on note:

- Précision de la mesure de la masse de béton recueillie par coup de piston

- Précision de la mesure de la teneur en air
- Précision de la mesure de la masse volumique
- Précision de l'évaluation des  $T_{\text{eff}}$  et  $T_{\text{moy}}$  sur le graphique de pression de pompage.

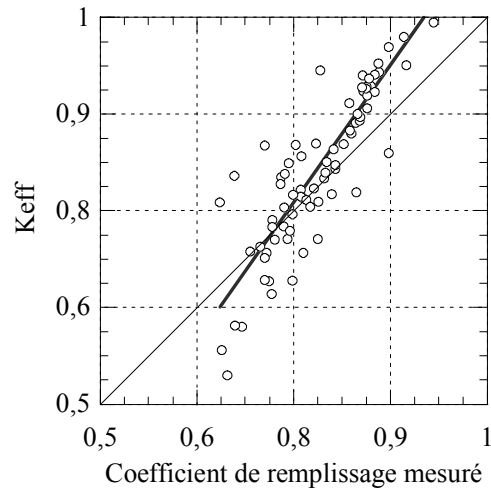


Figure 3.16 : Relation entre les coefficients de remplissage mesurés et prédit ( $K_{\text{eff}}$ )

Cette relation montre qu'il est possible, en analysant les courbes de pression de pompage, de déterminer le coefficient de remplissage des pistons. Avec le diamètre des boyaux, il est possible d'évaluer la vitesse effective si la masse volumique et la teneur en air du béton sont connues.

Ces résultats montrent également que le coefficient de remplissage varie en fonction de la cadence des pistons de refoulement. Il sera donc important de considérer cet aspect lors du développement d'un modèle de prédiction du débit réel moyen puisqu'un coefficient fixe ne peut être utilisé.



## **Chapitre 4**

### **Essais sur bétons**

Ce chapitre est dédié à la présentation des mélanges de béton qui ont été pompés dans le circuit de laboratoire. Lors de cette campagne d'essais, des données de débits et pression ont été enregistrées pour obtenir de résultats pour valider un modèle de prédiction de la pression de pompage. L'influence du rapport eau liant, du type de liant et du volume de pâte sur les propriétés de pompage a été étudiée. Ce sont ces derniers résultats qui sont présentés et analysés dans ce chapitre.

## 4.1 Présentation des mélanges de béton

Les mélanges de béton présentés au Tableau 4.1 ont été fabriqués et pompés dans le circuit de pompage présenté au chapitre 3. L'Annexe F présente plus en détail ces formulations. Les variables de formulation de l'étude sont : le type de liant (4 types), le rapport massique eau/liant (0,40 et 0,65) et le volume de liant (37%-groupe1, 32%-groupe3 et 30%-groupe4). Puisque la densité d'un liant à l'autre est différente, la masse de liant nécessaire pour obtenir un même volume est différente. Un groupe de mélanges de béton à masse de liant constante (groupe 2) a été réalisé puisque dans la pratique les mélanges sont plus souvent comparés en terme de masse de liant. La nomenclature du mélange de béton est composée du type de ciment, du groupe de mélange et de la masse approximative de liant utilisé.

Tableau 4.1 : Formulations des mélanges de béton

Nom*	E/L	Liant (kg)	eau (kg)	air (%)	pâte (%)	Aff. (mm)
LT-1-500	0,40	514	207	2,5	37,4	220
ST-1-500	0,40	500	200	2,4	37,2	205
SF-1-500	0,42	502	211	2,5	38,0	220
T10-1-500	0,42	514	214	2,7	37,8	240
ST-2-450	0,40	449	179	2,4	33,4	200
ST-2h-330	0,65	327	212	1,5	32,5	210
LT-2-450	0,40	450	179	3,1	32,6	210
LT-2h-330	0,65	331	215	2,1	32,3	230
ST-3-440	0,40	432	172	2,6	32,0	210
LT-3-440	0,40	442	176	3,0	31,8	200
SF-3-440	0,40	431	172	3,7	31,7	50
T10-3-440	0,40	449	180	3,5	32,3	80
Non pompable :						
T10-4-410	0,39	414	163	4,2	29,5	220
ST-4-410	0,40	405	162	2,6	30,1	180
LT-4-410	0,40	413	165	3,0	30,0	160

\* Légende des noms :

LT – Liant ternaire (fumée silice et laitiers)

ST – Liant ternaire (fumée de silice et cendres volantes)

SF - Liant avec fumée silice

T10 - Liant type 10

## 4.2 Effet du volume de pâte

Le volume de pâte de liant semble être un facteur déterminant sur la pompabilité du béton. Pour les mélanges présentés au Tableau 4.1, tous les mélanges contenant 30% de pâte de liant (groupe 4) n'ont pas été pompables. Ceci confirme ce qui avait été observé dans la documentation. Pour un squelette granulaire donné et un circuit de pompage donné, le mélange de béton doit contenir un volume de pâte minimal pour que le pompage soit possible.

La Figure 4.1 présente les propriétés de pompage pour deux mélanges de béton fabriqués avec le même liant. Le mélange de référence (celui représenté par la courbe du haut) est un mélange à 32% de pâte de liant et de rapport E/L=0,40. Lorsque le volume de pâte est augmenté à 38% (courbe du bas) la pente est plus faible (plus facile à pomper).

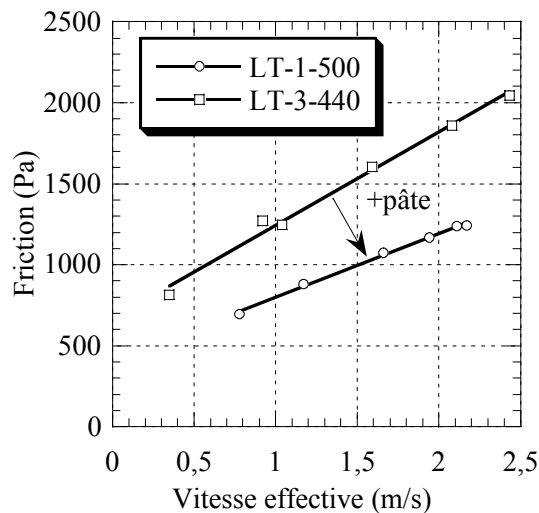


Figure 4.1 : Effet du volume de pâte sur les propriétés de pompage

La Figure 4.2 montre une forme de plateau typique pour un mélange contenant un très grand volume de pâte de liant. Pour ce mélange un volume de pâte 8% supérieur à un béton comparable (même rapport sable/pierre et même rapport eau/liant) et pompable a été utilisé. L'effet est comparable à un haut rapport E/L c'est-à-dire qu'un pic de pression doit être

surmonté avant l'écoulement et ensuite un plateau plat pendant l'écoulement est décrit sur la courbe.

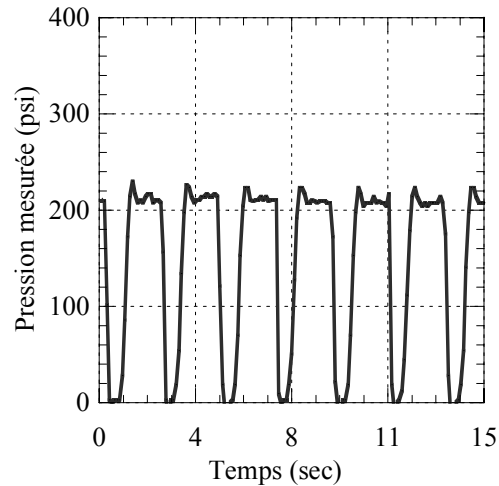


Figure 4.2 : Effet d'un volume de pâte excessif sur la courbe de pression

### 4.3 Effet du type de liant

Les groupes de mélanges ayant un même volume de pâte ont été pompés à différents débits. La Figure 4.3 présente la pression de pompage en fonction de différentes vitesses effectives d'écoulement du béton pour les mélanges contenant 32% de pâte (groupe 3). Pour les trois types de liant présentés, la pente des relations est très différente. Le liant le plus dense (T10) offre une plus grande facilité au pompage. Par contre, le liant le moins dense (ST), est le plus difficile à pomper (pente plus abrupte). À volume constant, la masse de liant est différente, et comme le rapport E/L est constant, la quantité d'eau dans le mélange de béton est aussi différente d'un mélange à l'autre. La Figure 4.3b montre l'effet du type de liant sur les propriétés de pompage pour les mélanges de béton contenant 38% de pâte de liant (groupe 1). La même tendance que pour les mélanges à 32% de pâte de liant est observée. Le mélange contenant le liant le plus dense est le plus facile à pomper car il contient plus d'eau et de ciment. Rappelons que cette façon de comparer les mélanges n'est pas celle adoptée généralement par l'industrie.

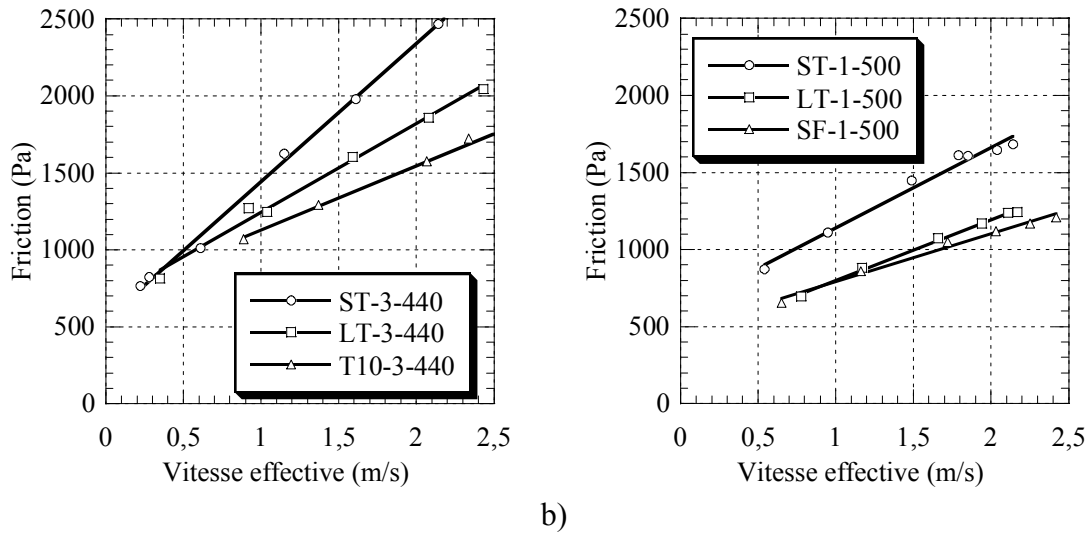


Figure 4.3 : Effet du type de liant sur les propriétés de pompage pour les mélanges contenant 32% de pâte de liant en a) et 38% de pâte de liant en b)

Des mélanges de béton ont été fabriqués à masse de liant constante et à rapport E/L constant (0,40). C'est habituellement l'approche utilisée par les producteurs de béton. La Figure 4.4 montre les propriétés de pompage pour trois mélanges de béton fabriqués à masse constante de liant. Deux mélanges du groupe 2 et un mélange du groupe 3 ont été fabriqués avec 450kg/m<sup>3</sup> de liant. Pour les deux mélanges de béton fabriqués avec les liants ternaires, la tendance observée précédemment est inversée. Le mélange fabriqué avec le liant le moins dense (ST-2-450) montre une pente plus faible que le mélange avec le liant ternaire le plus dense (LT-2-450) et est donc plus facile à pomper. Par contre, le mélange fabriqué avec un ciment Type 10 (T10-3-450), le liant le plus dense utilisé pour ces trois mélanges de béton, présente une pente plus faible que les deux liants ternaires ce qui est contraire à ce qui était attendu. Le mélange T10-3-450 a toutefois été pompé alors que son affaissement était de 80 mm ce qui est très différent des valeurs visées de 200 mm.

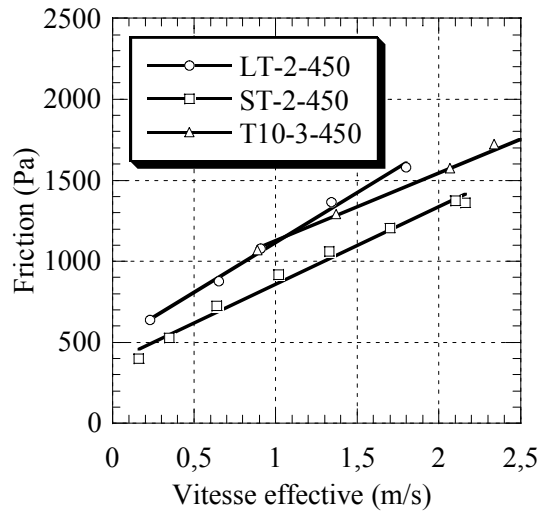


Figure 4.4 : Effet du type de liant sur les propriétés de pompage pour les mélanges comparés à masses constantes de liant ( $450 \text{ kg/m}^3$ )

Les résultats présentés sur l'effet du type de liant sur les propriétés de pompage montrent qu'un liant de type ternaire (ou binaire) peut être utilisé pour diminuer la masse de liant dans un mélange de béton en conservant la même pompabilité par l'utilisation d'un même volume de liant (et possiblement réduire le prix du béton en fonction du prix du liant ternaire). Lorsque les mélanges sont comparés à masses constantes de liant, c'est l'inverse qui est observé. Le mélange à base du liant le moins dense avait une pente plus faible.

#### 4.4 Effet du rapport E/L

Le rapport E/L semble être le facteur qui modifie le plus les propriétés de pompage. En pratique, le rapport E/L varie beaucoup d'un mélange à l'autre en fonction de la résistance à la compression souhaitée. Lorsqu'un très haut rapport E/L est utilisé, ces mélanges sont appelés « maigres » puisqu'ils contiennent peu de liant. Ces mélanges de béton sont d'ailleurs réputés pour être difficiles à pomper et provoquent souvent des blocages.

Le groupe de mélanges no 2 présente des mélanges à masse constante de liant pour deux rapports E/L. Les liants ST et LT ont été utilisés pour fabriquer des mélanges de béton de rapports eau/liant de 0,40 et 0,65.

La Figure 4.5 présente les propriétés de pompage pour ces quatre mélanges de béton. Le premier effet constaté est que les mélanges à haut rapport E/L sont plus faciles à pomper (créent moins de friction). Pour les deux mélanges de rapport E/L=0,40, le mélange fabriqué avec le liant le moins dense (ST) est plus facile à pomper que celui avec le liant le plus dense (LT).

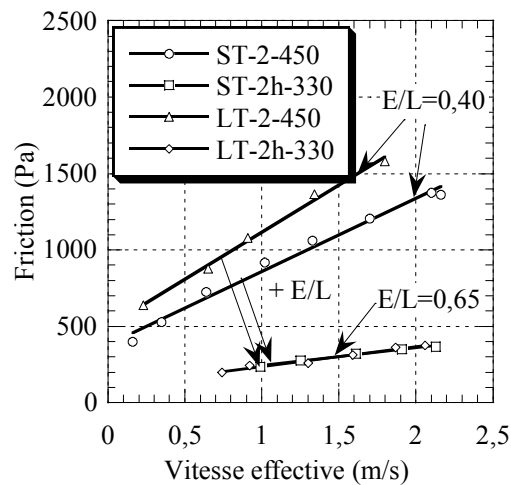


Figure 4.5 : Effet du rapport E/L sur les propriétés de pompage

Les praticiens avaient observés que les mélanges à haut rapport E/L sont plus problématiques lors des opérations de pompage. On constate que sur les mélanges présentés jusqu'à présent, lorsque le rapport E/L augmente, le pompage est plutôt facilité. D'ailleurs, le rapport E/L est l'un des facteurs affectant le plus la viscosité de pompage (la pente). Les mélanges de bétons contenant plus d'eau sont donc plus faciles à pomper en terme de pression de pompage. Par contre, les praticiens observent que pour les bétons de hauts rapports E/L, les bouchons sont plus fréquents. Il existe probablement une valeur de viscosité minimale de la pâte pour éviter une instabilité du mélange de béton. En prenant

comme hypothèse que la viscosité d'interface mesurée au tribomètre est fonction de la viscosité de la pâte, il existe peut-être une valeur minimale de la viscosité d'interface qui serait un indicateur d'un trop haut rapport E/L. Les données recueillies ne permettent pas de vérifier cette hypothèse.

Un cas particulier a été observé. La Figure 4.6 présente la relation entre la pression appliquée directement sur le béton dans le piston (calculée à partir de la pression hydraulique du piston de pompage) et la pression mesurée à la sortie du réducteur (qui comprend aussi le passage dans la valve en S et un coude à 90 degrés). Les données sont présentées pour deux mélanges de bétons, l'un à haut rapport E/L=0,65 et le second à plus faible rapport E/L=0,40, mais dont les volumes de pâte de liant sont semblables. Pour chacune des relations, chacun des points représente un débit de pompage.

Sur la Figure 4.6, le mélange de rapport E/L 0,40 présente peu de perte de charge lors du passage dans la série de singularités : en effet, pour une pression dans le cylindre de refoulement de 200 psi, elle est de 190 psi à la sortie des singularités. C'est donc que seulement 10 psi sont nécessaires à l'écoulement du béton dans l'ensemble des singularités alors que 190 psi sont nécessaires à l'écoulement dans le reste de la section de boyau souple. Pour le mélange de rapport E/L=0,65, par exemple, pour 150 psi en amont des singularités il reste 75 psi en aval. Environ 50% des pertes de charges se produisent dans les singularités (et le reste dans le boyaux souple) dans le cas du haut rapport E/L, alors que c'est seulement 5% pour le mélange à faible rapport E/L.



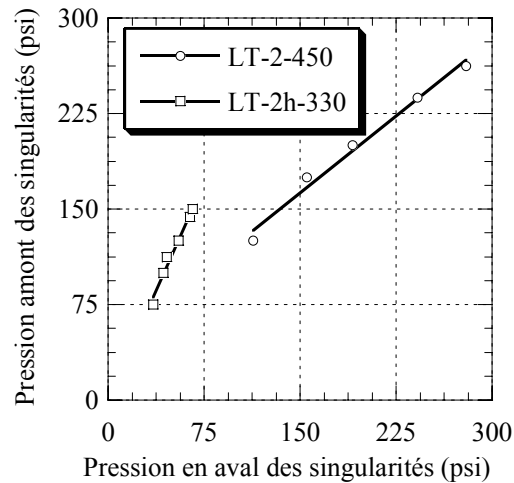


Figure 4.6 : Pertes de charges dans la valve de déviation, un coude et réducteur.

Figure 4.7 présente les pressions de pompage pour un mélange à haut rapport E/L. Lorsqu'un très haut rapport E/L est utilisé dans un mélange de béton, la pâte contenue entre les granulats est très peu visqueuse. Entre les coups de pistons, les granulats bougent par gravité et se touchent entre eux. Au départ du coup de piston, une friction plus élevée doit être vaincue avant qu'il y ait écoulement (présence d'un pic sur la courbe des pressions de pompage). Cependant, en général, pour des rapports E/L élevés, les pressions sur le plateau sont faibles. Ce phénomène montre un début d'instabilité du mélange de béton lors du pompage. Les phénomènes d'instabilité ne sont pas étudiés dans cette thèse.

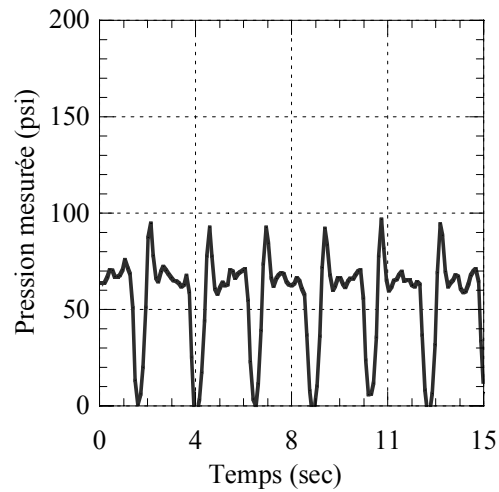


Figure 4.7 : Effet d'un haut rapport E/L sur la courbe de pression

#### 4.5 Réel gain avec les liants ternaires

Dans la pratique, on entend souvent qu'avec un liant ternaire, le même mélange de béton peut être pompé avec 20kg de liant en moins par m<sup>3</sup>. Il s'agit d'une économie considérable. Le mécanisme est relativement simple, l'ajout de particules moins denses que le ciment type 10 fait en sorte que pour une masse de liant inférieure de 20 kg, le volume occupé demeure semblable. Par exemple pour une masse de ciment Type 10 (densité = 3,15), 400 kg, occupe un volume de 127 litres. Pour occuper le même volume, il faut seulement 361 kg de liant ST (densité = 2,85) ou 389 kg de liant LT (densité = 3,07).

#### 4.6 Effet de l'air entraîné

Pour étudier l'effet de l'air entraîné, trois mélanges de béton avec air entraîné ont été fabriqués avec un liant contenant de la fumée de silice puis pompés. Les mélanges sont présentés au Tableau 4.2. Trois rapports E/L ont été utilisés: 0,30; 0,35 et 0,41. Pour le mélange ayant un rapport E/L = 0,41, le volume de pâte est de 10% inférieur à celui des deux autres mélanges.

Tableau 4.2 : Propriétés des mélanges de béton avec air entraîné

Nom mélange	E/L	Liant (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Pierre (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	Pâte sans air (%)	Pâte avec air (%)	S/ (S+G)
SF01A	0,30	643	190	681	680	8,5	40,6	49,1	50
SF02A	0,35	600	207	689	691	7,5	40,8	48,3	50
SF03A	0,41	400	164	787	780	11,5	29,8	41,3	51

La Figure 4.8 présente la forme des plateaux de pompage pour les 3 mélanges pour une seule vitesse de pompage. Pour les deux premiers mélanges, où la teneur en pâte de liant est très grande, la forme des plateaux demeure plate et relativement longue. Pour le troisième mélange dont la composition est plus représentative d'un mélange utilisé en pratique, on remarque une montée en pression plus lente et un plateau beaucoup plus court. Lors de la montée en pression, le béton se comprime et il ne bouge pratiquement pas dans le boyau. Ceci a pour conséquence un débit de pompage réduit.

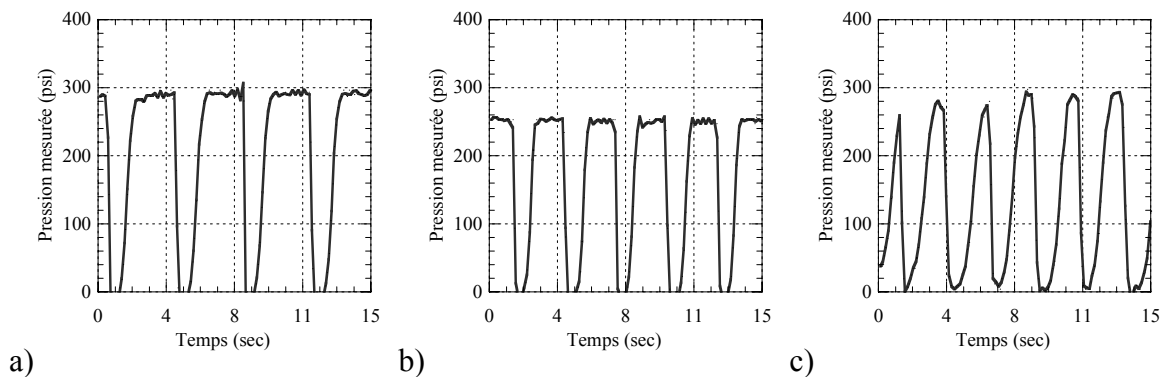


Figure 4.8 : Présentation de trois formes de plateaux de pompage pour les mélanges à air entraîné. a) SF01A, b) SF02A, c) SF03A

Le volume de pâte du troisième mélange, calculé sans tenir compte de la présence de l'air entraîné, est inférieur à 30%. Pourtant, pour les mélanges présentés précédemment, les mélanges contenant 30% de pâte sans air n'ont pas pu être pompés. L'air entraîné semble donc avoir un effet favorable sur l'aptitude au pompage.

Lorsque le béton est soumis à une pression, l'air étant le seul élément compressible, le pourcentage d'air diminue. L'exemple suivant montre que pour un béton avec 10% d'air entraîné soumis à une pression de 3000 kPa (pression rencontrée couramment sur le béton dans une conduite de pompage), le volume d'air diminue à près de 0,3% (voir exemple de calcul ci-dessous). Le volume d'air est donc pratiquement négligeable.

Exemple de calcul de perte du volume d'air. On a :

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad [ 4.1 ]$$

avec :

$P_1$  = pression atmosphérique (100kPa);

$V_1$  = 100 litres;

$P_2$  = 3000 kPa;

$V_2$  = volume occupé par l'air dans le boyau pressurisé.

En calculant, on trouve  $V_2 = 3,3$  litres ou 0,3 % dans le mélange de béton.

Le volume d'air contenu dans la pâte et aidant à la maniabilité à l'air libre n'est donc plus présent dans la conduite lors du pompage. La composition du mélange de béton (les quantités / m<sup>3</sup>) ne sont donc plus les mêmes dans la conduite, puisqu'un volume d'air de 100L/m<sup>3</sup> (10%) est perdu. Le Tableau 4.3 montre la composition d'un mélange typique à l'air libre avec 10% d'air et la composition recalculée en considérant seulement 0,3% d'air. L'exemple montre que, dans la conduite, le volume de pâte (liant et eau) est supérieur lorsque l'air est comprimé ou en solution. L'effet est d'autant plus important lorsque les teneurs en air sont élevées.

Tableau 4.3 : Exemple de composition de mélange de béton avec et sans air

Constituant	Mélange avec air	Composition mélange sans air
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	391,13	433,29
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	156,45	173,32
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	836,16	926,28
Pierre (kg/m <sup>3</sup> )	836,16	926,28
Teneur air (%)	10	0,3
Teneur pâte sans air (%)	<b>28,0</b>	<b>31,1</b>
Teneur pâte avec air (%)	38,0	31,4

Lorsque la formulation d'un mélange de béton avec air est réalisée, il est donc important de considérer le volume de pâte sans tenir compte de l'air (puisqu'elle disparaît) mais en tenant compte de la concentration artificielle en pâte (l'eau et le liant) qui augmente temporairement dans la conduite.

Beaupré (1994) a développé un concept du haut volume d'air initial pour le béton projeté par voie humide qui consiste à entraîner un volume d'air important dans le béton pour améliorer la pompabilité et tout de même conserver un certain volume d'air une fois le béton projeté en place. Ce concept, jusqu'ici mal expliqué, reçoit pour la première fois une explication.

## **Chapitre 5**

### **Analyse des résultats**

Avec les différentes mesures réalisées en laboratoire et en chantier sur des essais de pompage, la validation du modèle de prédiction de la pression de pompage en fonction du débit est présentée dans ce chapitre. D'abord la validation pour les essais de laboratoire (boyaux de 50 mm de diamètre en caoutchouc) est présentée puis la validation pour les essais de chantier (boyaux d'acier de diamètre 125 mm). L'effet des coudes et réducteurs sur les pertes de charge est expliqué ainsi que l'effet de la hauteur de pompage.

Par la suite, des observations sur le coefficient de remplissage sont décrites et analysées. Un modèle empirique est proposé pour prédire le coefficient de remplissage pour la pompe de laboratoire.

## 5.1 Prédiction de la courbe pression débit pour le circuit de laboratoire

Au moment des essais visant à évaluer l'effet de différents paramètres de formulation de mélange de béton sur la pompabilité sur le circuit de laboratoire, les données de pression à différents débits ont été recueillies. Les données rhéologiques et tribologiques recueillies pour cette campagne d'essais sont présentées à l'Annexe G et l'Annexe A présente les courbes rhéologiques et tribologiques complètes.

En utilisant les équations de Kaplan (2000) présentées au Chapitre 1 les pressions de pompage peuvent être prédites avec :

$$P = \frac{2L}{R} \left[ \tau_{0i} + \frac{\frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} - \frac{R}{4\mu} \tau_{0i} + \frac{R}{3\mu} \tau_0}{1 + \frac{R}{4\mu} \eta} \right] \quad [ 5.1 ]$$

Si :

$$P \geq \frac{2L}{R} \cdot \tau_0 \quad [ 5.2 ]$$

Pour ce cas, le cisaillement est plus important que le seuil de cisaillement du béton et l'écoulement a lieu aussi dans le béton. Dès lors, les propriétés rhéologiques du béton en plus des propriétés de l'interface doivent être prises en compte.

Pour le cas où il n'y a pas de cisaillement dans le béton, on utilise :

$$P = \frac{2L}{R} \left( \tau_{0i} + \frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} \eta \right) \quad [ 5.3 ]$$

Pour utiliser ces équations et établir une prédiction de la courbe Pression – Débit réel, il faut supposer un  $k_r$  (coefficient de remplissage). Les travaux de cette thèse montrent bien que ce coefficient varie en fonction du taux de pompage (voir Figure 3.15a). En premier lieu, le modèle de Kaplan est utilisé avec un coefficient fixe  $k_r$  pour simuler une prédiction des pressions de pompage avec les connaissances actuelles.

La Figure 5.1 présente, avec les données pour un mélange, la courbe débit pression prédite avec un  $k_r = 0,80$ . À partir d'un certain débit, le cisaillement en conduite dépasse le seuil de cisaillement du béton et le changement de pente est observé. La courbe réelle pression débit de ce mélange de béton pompé est présentée pour fin de comparaison. Cette courbe présente plutôt une courbure qui va dans le sens opposé à la cassure du modèle prédictif.

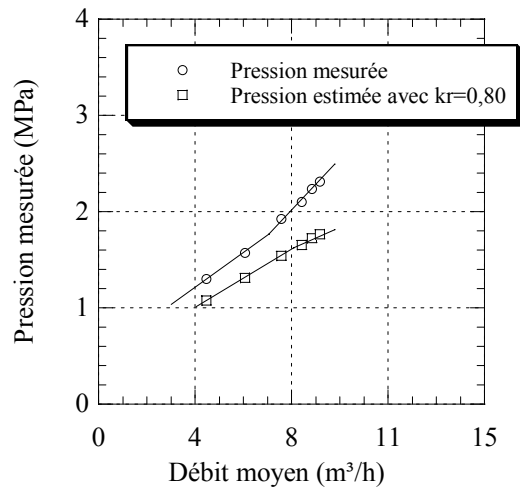


Figure 5.1 : Comparaison entre les mesures réelles et les prédictions des pression de pompage avec le modèle en utilisant un  $k_r=0,80$

Les données recueillies montrent clairement que le coefficient de remplissage varie en fonction de la cadence. À partir des courbes de pression mesurées, il est possible d'établir le  $k_r$  (voir section 3.8). La Figure 5.2 montre la prédiction du modèle lorsque le  $k_r$  réellement mesuré est introduit au lieu d'utiliser un  $k_r$  fixe. Cette fois, le modèle montre une courbure allant dans le même sens que les mesures réelles.



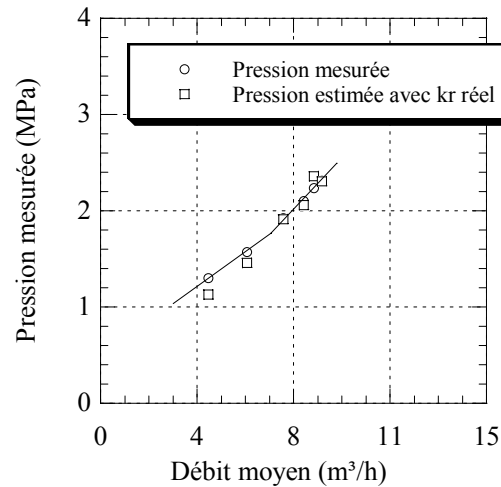


Figure 5.2 : Comparaison entre les mesures réelles et les prédictions des pressions de pompage avec le modèle en utilisant le  $k_r$  mesuré

Cet exercice montre que la prise en compte des mesures rhéologiques modifie légèrement la courbe pour les hauts taux de cisaillement. Cependant, le  $k_r$  semble être un paramètre non négligeable qu'il faut prendre en compte pour pouvoir établir avec plus de précision la prédiction de la courbe pression débit réel. À l'Annexe I, tous les graphiques caractéristiques des mélanges pompés présentés de la même façon que la Figure 5.2 sont résumés. Pour l'ensemble des figures de cette annexe, le modèle semble bien coller. Du moins, pour l'ensemble, la forme de la courbe et la pente sont semblables au modèle prédictif. Pour certains mélanges, on note un décalage entre les mesures et le modèle. Ceci est fort probablement dû au vieillissement du béton lors des essais. Les essais rhéologiques et tribologiques ont eu lieu avant l'essai de pompage proprement dit.

Dans une majorité de cas, un cisaillement se produit dans le béton pour les hauts taux de pompage. Cependant, la légère cassure dans la courbe caractéristique débit pression du modèle demeure mineure. Aussi, lorsque les courbes sont tracées en fonction de la vitesse effective (comme au chapitre 4) les courbes vitesse pression sont linéaires pour l'ensemble des mélanges qui ont été pompés dans le circuit de boyaux de caoutchouc en laboratoire.

Ceci montre que le cisaillement, s'il a lieu, n'est pas une composante très importante dans la somme des vitesses ou somme des débits.

La Figure 5.3 présente pour tous les mélanges pompés une comparaison entre la pression prédite et la pression réellement mesurée.

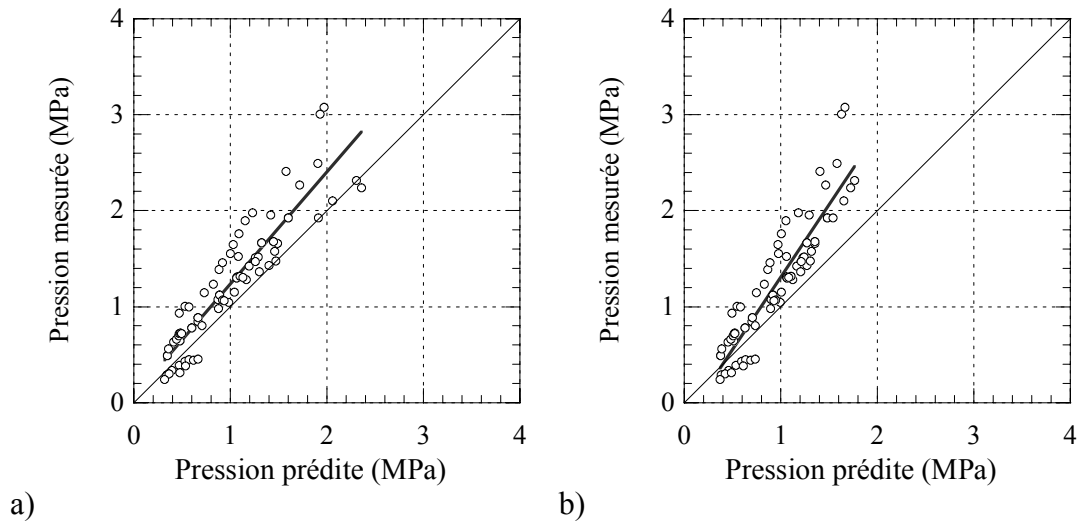


Figure 5.3 : Validation du modèle : a) en utilisant le coefficient de remplissage mesuré; b) en supposant un coefficient de remplissage fixe = 0,80.

## 5.2 Prise en compte des réducteurs et des coudes

### 5.2.1 Problématique des réducteurs

Les réducteurs sont connus pour être un endroit privilégié pour la formation des bouchons. Pratiquement tous les camions-pompes ont au moins un réducteur à la sortie de la pompe. Le guide Schwing traite le réducteur comme un élément de sécurité. On y explique que lors du passage du béton dans le réducteur, si un blocage survient c'est que le béton n'est pas assez déformable : il doit alors être reformulé.

Lors du passage du béton dans un réducteur, deux phénomènes sont impliqués : l'augmentation du volume de pâte nécessaire à la formation d'une couche lubrifiante et l'augmentation de la vitesse d'écoulement du béton.

Le premier phénomène qui se produit dans un réducteur est celui de l'augmentation du volume de pâte nécessaire à la formation de la couche lubrifiante. La Figure 5.4 présente une section de boyau de pompage rempli de béton. La périphérie est constituée d'une mince couche de pâte de ciment estimée à 1 mm pour l'exemple montré. Pour évaluer le pourcentage volumique pâte (P) nécessaire pour former cette couche, l'équation [ 5.4 ] est utilisée :

$$P = \frac{(R_1)^2 - (R_1 - e)^2}{(R_1)^2} \quad [ 5.4 ]$$

où :

- P : Pourcentage volumique de pâte de ciment
- $R_1$  : Rayon du boyau de pompage
- e : épaisseur de la couche limite (1 mm environ).

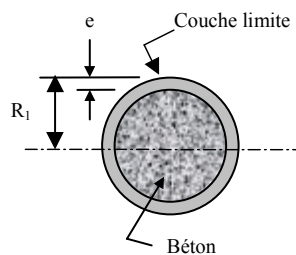


Figure 5.4 : Proportion volumique occupée par la couche limite

Ainsi, il est possible de porter en graphique (Figure 5.5) le pourcentage volumique de pâte de ciment nécessaire pour former une couche de 1 mm d'épaisseur pour différents diamètres de boyau. Le volume de pâte mobilisé pour former cette couche augmente alors que le diamètre du boyau diminue. Par exemple (voir Figure 5.5), pour former une couche de 1 mm d'épaisseur pour un boyau de diamètre 125 mm (5 po), 3,2 % de pâte contenue

dans le mélange de béton est nécessaire. Pour former toujours une couche de 1 mm dans un boyau de 50 mm (2 po), le béton doit fournir 7,8 % de pâte. Plus le diamètre est petit, plus le pourcentage volumique de pâte de ciment qui doit être libre est important

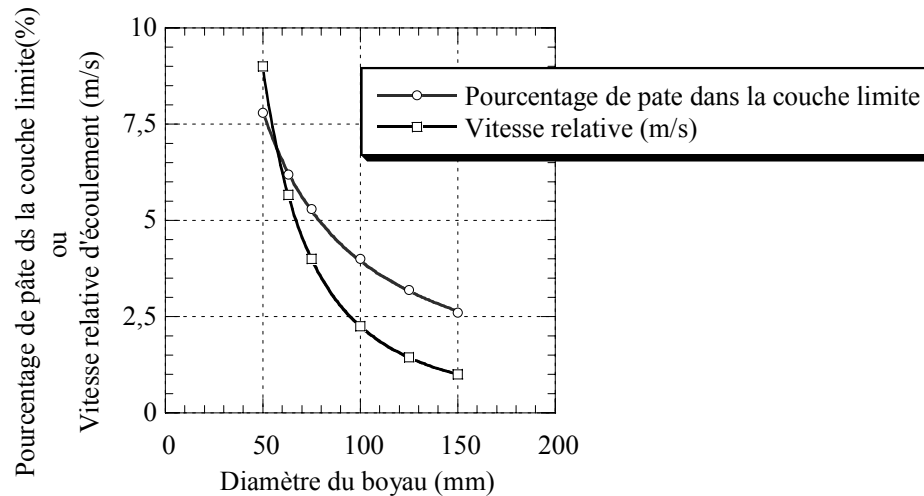


Figure 5.5 : Évolution de la vitesse et de l'apport en pâte de ciment à la couche limite dans un réducteur

Le deuxième phénomène, soit l'augmentation de la vitesse, est dû à la réduction du diamètre du boyau. Pour un débit constant, lorsque la surface diminue, la vitesse augmente. Il a été vu que lorsque la vitesse augmente, la pression nécessaire au pompage augmente. La Figure 5.5 présente pour plusieurs diamètres de boyau la vitesse relative d'écoulement du béton. L'exemple est présenté pour une vitesse d'écoulement de 1m/s pour un diamètre de 150mm. Suivant l'exemple présenté à la Figure 5.5, pour un réducteur passant d'un diamètre de 150 mm à 75 mm par exemple, la vitesse d'écoulement augmente de 1 m/s à 4 m/s. Cet effet est assez prononcé car l'augmentation de la vitesse se fait en proportion avec le carré du diamètre.

Le volume de pâte a été identifié comme étant un facteur déterminant sur la pompabilité. Il est donc possible qu'un mélange de béton soit apte au pompage pour un diamètre de boyau et ne puisse pas être pompé dans un diamètre plus petit en raison de l'augmentation du volume de pâte nécessaire pour former la couche lubrifiante. Pour formuler un mélange de béton pompable, il suffit de connaître la quantité de vides compris entre les granulats et

d'ajouter une quantité suffisante de pâte de ciment pour combler ces vides et d'ajouter aussi le volume de pâte requis pour la formation de la couche lubrifiante.

### **5.2.2 Mesure des pertes de charge dans les réducteurs**

Lors des essais de pompage réalisés en laboratoire, des mesures de pression ont été réalisées avec deux capteurs de pression : l'un situé en amont et l'autre en aval d'un réducteur. Le réducteur a un diamètre variant de 100 mm à 50 mm, sur une longueur de 1,63 m.

L'Annexe J présente les mesures de pressions réalisées pour différentes vitesses de pompage, pour chacun des mélanges de béton. La Figure 5.6 présente graphiquement la pression mesurée en amont et en aval pour tous les mélanges de béton et tous les débits de pompage. La pression mesurée en amont et en aval est pratiquement identique. La moyenne des différences de pression mesurées est de 1,8 psi (12kPa). Ces valeurs sont très près de la précision des capteurs de pression. Il a été impossible de traiter ces valeurs pour déterminer une équation en fonction de la vitesse et des propriétés du béton frais pour prédire la perte de charge dans le réducteur. Cependant, les observations montrent que lorsque le béton est apte au pompage, la majorité de la perte de charge se produit donc dans le boyau en aval du réducteur et non dans le réducteur lui-même.

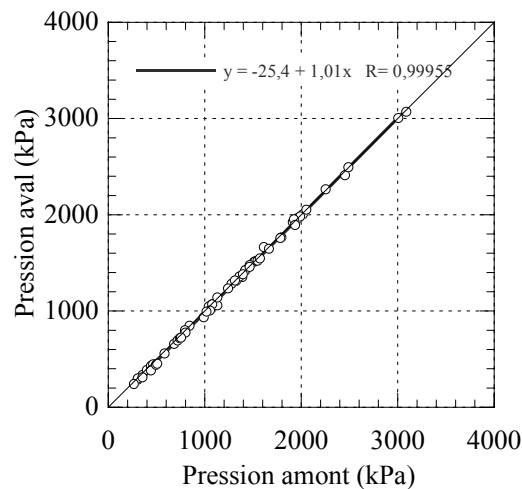


Figure 5.6 : Comparaison de la pression mesurée en amont et en aval d'un réducteur

Les données recueillies pendant cette étude ne montrent pas de perte de charge additionnelle due au réducteur lui-même. Cependant, les praticiens observent qu'en utilisant un réducteur sur une configuration de pompage que la pression de pompage est supérieure. Pour une configuration de pompage, par exemple de 100 m de longueur, il est préférable d'utiliser le réducteur le plus près possible de la fin du circuit (le plus loin possible de la pompe), de sorte que le boyau de diamètre le plus petit sera le plus court possible. L'augmentation de la pression de pompage observé en pratique lors de l'utilisation d'un réducteur est donc causée par l'utilisation d'un boyau de plus petit diamètre et non par le réducteur.

### 5.2.3 Mesure des pertes de charge dans les coudes

Pour mesurer l'effet des coudes sur les pressions de pompage, deux capteurs de pression ont été installés en amont et en aval d'une série de coudes (2 coudes de 90 degrés et 2 de 45 degrés vis-à-vis une articulation de la flèche du camion pompe). Chacun des coudes a un rayon de 250 mm. Comme hypothèse, on peut considérer un coude comme une section droite de longueur équivalente à la longueur de l'arc de cercle parcourant le centre de la section du coude. Pour un coude de 90 degrés, la longueur de l'arc de cercle est de :

$$L_{arc} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,250}{4} = 0,40 \text{ m} \quad [ 5.5 ]$$

Pour les 270 degrés entre les deux capteurs, la longueur équivalente est de 1,20 m.

L'Annexe K présente pour tous les mélanges et tous les débits de pompage, les pressions mesurées par les deux capteurs et la différence entre les deux capteurs.

La Figure 5.7 présente les pressions mesurées pour les capteurs situés en amont et en aval d'une série de coudes. La tendance montre que les pressions sont légèrement plus élevées pour le capteur situé en amont de la série de coudes.

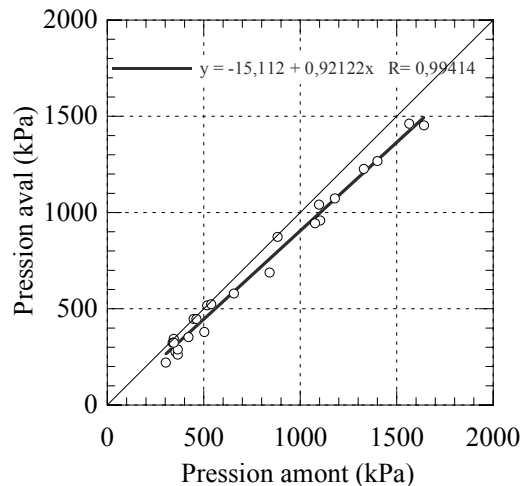


Figure 5.7 : Pression en amont et en aval d'une série de coudes totalisant 270 degrés

L'observation de tous les résultats dans l'ensemble montre une différence moyenne d'environ 74 kPa. Par hypothèse, en prenant les propriétés tribologiques moyennes des chantiers ( $G_{ia}=7\text{Nm}$  (357Pa) et  $H_{ia}=10\text{Nms/m}$  (770 Pas/m)) et en prenant la longueur équivalente de 1,20m pour une vitesse effective de 1,9 m/s, on calcule la perte de charge :

$$P = [\tau_{0i} + \eta_i \cdot V] \cdot \frac{2L}{R_b} \quad [ 5.6 ]$$

$$P = [357 + 770 \cdot 1,9] \cdot \frac{2 \cdot 1,20}{0,0625} = 70kPa \quad [ 5.7 ]$$

Avec les données recueillies et la précision des capteurs, il n'est pas possible d'observer une perte de charge supplémentaire due à la non linéarité du tuyau. Seule la longueur équivalente du coude semble responsable de la perte de charge. Kaplan (2000) avait eu les mêmes conclusions pour des coudes de rayon = 0,28 m.

### 5.3 Prise en compte de l'effet de la hauteur

Lorsque le circuit de pompage comporte une montée (ou une descente), l'effet de la gravité doit être pris en compte sur le calcul de la pression appliquée par la pompe avec :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad [ 5.8 ]$$

où :

- P : pression appliquée à la base (Pa);
- $\rho$  : densité du béton (kg/m<sup>3</sup>);
- g : accélération gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>);
- h : hauteur de la colonne de béton (m).

Pour le cas des conduites descendantes en charge, la dépression peut être calculée avec la même formule. Il doit rester des sections de tuyauterie en aval de la descente pour éviter que la tuyauterie ne se vide sous l'effet de la gravité. En chantier, avec le camion pompe, il a été observé que dans la ou les sections descendantes le béton tombe sous l'effet de la gravité et la tuyauterie se vide lors de l'arrêt des opérations de pompage. Par contre, pendant le pompage, entre les coups de piston, cette section descendante n'a pas le temps de se vider et il demeure un effet de succion lorsque la conduite reste en charge.



Il y a donc trois cas à considérer pour tenir compte de l'effet de la gravité :

- Le cas où seules les sections ascendantes sont pleines de béton. Ce cas se produit lors de l'amorçage de la pompe, lors d'un redémarrage après un arrêt des opérations de pompage et lorsque la dernière section est verticale en redescendant;
- Le cas où le pompage se produit en continu et que la conduite descendante n'a pas le temps de se vider. Toute la tuyauterie est pleine et la section descendante produit une succion;
- Le cas où les deux cas précédents se produisent en même temps. Entre les coups de piston, une partie seulement de la section descendante a le temps de se vider.

Pour calculer l'effet de la gravité sur la pression de pompage, il faut donc savoir dans quel cas on se situe. Le cas le plus critique est le premier cas. Il suffit de connaître la hauteur maximale entre la pompe et le point le plus haut du circuit de pompage. Le cas le moins critique est le deuxième cas où toute la conduite est en charge. La hauteur est la hauteur entre la pompe et le point de sortie du circuit de pompage. Pour le dernier cas, l'effet est plutôt difficile à prédire. Les valeurs se situent entre le premier et le deuxième cas.

### **5.3.1 Analyse de l'effet de la hauteur pour la flèche complète**

Pour les chantiers visités, lors des arrêts des opérations de pompage, les pressions enregistrées sur le capteur 1 (le plus près de la sortie de la pompe) indiquent la pression statique due à la colonne de béton. L'Annexe M présente le relevé des pressions statiques enregistrées au capteur 1 de même que la hauteur due à la configuration de la pompe. Deux hauteurs sont indiquées. L'une est la hauteur maximale de la flèche du camion et l'autre est la hauteur entre le camion et la sortie du circuit de pompage. Les pressions statiques prévues pour ces deux cas sont calculées.

La Figure 5.8 montre la comparaison entre la pression prédite et mesurée en fonction de la hauteur maximale ou de la hauteur de la sortie de la flèche. Le cas où la hauteur maximale est prise en compte (Figure 5.8a) semble le plus probable. La portion descendante de la flèche se vide et cette portion de la configuration n'est pas en charge. Ceci correspond aux

observations en chantier. Pour trois chantiers (nos : 13, 15 et 19), les valeurs prédites ne correspondent pas. Aucune explication logique ne peut être donnée.

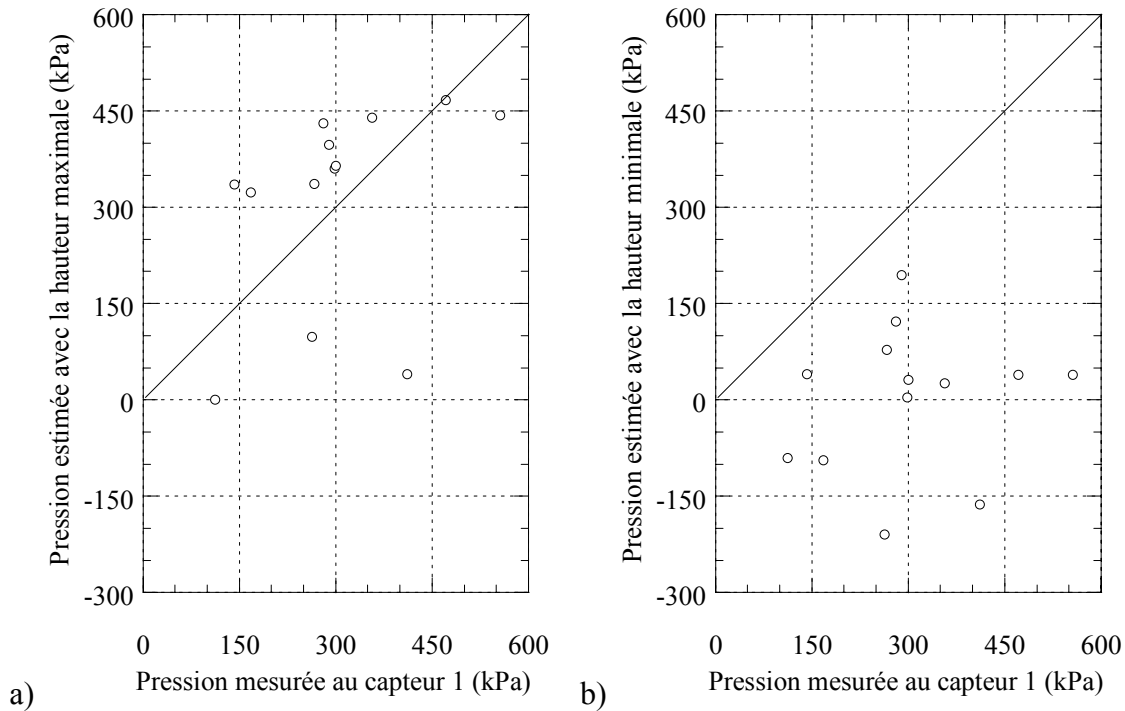


Figure 5.8 : Prédiction de la pression statique en fonction de la hauteur maximale de la flèche (a) et de la hauteur de la fin de la flèche (b)

### 5.3.2 Prédiction de la pression pour une section droite soumise à l'effet de la hauteur

La première section de la flèche a été instrumentée de deux capteurs de pressions à chaque extrémité (les capteurs no2 et no3). L'angle de chacune des sections est variable en fonction des distances et obstacles à franchir avec la flèche. Pour les cas où la section est horizontale, il n'y a pas d'effet de la gravité sur la pression. Pour les cas où la flèche possède une composante verticale, en plus de la perte de charge occasionnée par la friction, il faut tenir compte de l'effet de la hauteur sur la pression appliquée au capteur amont.

La Figure 5.9 présente un exemple de configuration de la flèche ainsi que la position des capteurs 2 et 3 (indiqués P1 pour le capteur 2 et P2 pour le capteur 3) pour le cas où la portion de la flèche descendante se vide. Pour tous les chantiers visités, la deuxième section de la flèche est toujours plus élevée que la première section.

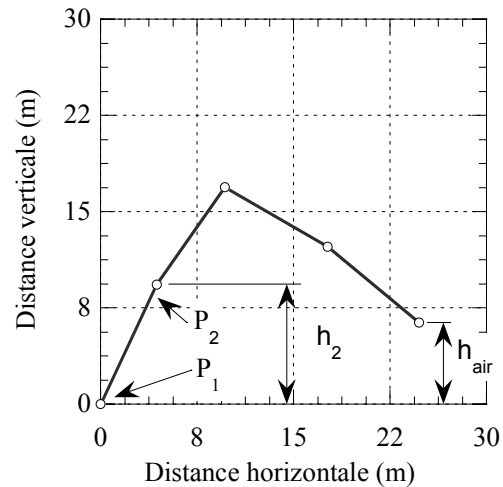


Figure 5.9 : Exemple d'une configuration de la flèche pour le calcul de la perte de charge entre deux capteurs

$P_1$  et  $P_2$  sont les pressions mesurées par les capteurs de pressions. Ces pressions incluent donc l'effet de la colonne de béton au dessus (ou au dessous) de ces capteurs.

$$P_1 = p'_1 + \rho \cdot g \cdot (h_{air}) \quad [ 5.9 ]$$

et

$$P_2 = p'_2 + \rho \cdot g \cdot (h_{air} - h_2) \quad [ 5.10 ]$$

où :  $p'_1$  et  $p'_2$  sont les pressions dues uniquement à la perte de charge par friction.

On cherche :

$$\Delta p = p'_2 - p'_1 \quad [ 5.11 ]$$

Avec  $P_1 - P_2$  on a :

$$P_2 - P_1 = p'_2 + \rho \cdot g \cdot (h_{air} - h_2) - p'_1 - \rho \cdot g \cdot h_{air} \quad [ 5.12 ]$$

d'où on isole :

$$P_2 - P_1 = p'_2 - p'_1 - \rho \cdot g \cdot h_2 + \rho \cdot g \cdot h_{air} - \rho \cdot g \cdot h_{air} \quad [ 5.13 ]$$

$$p'_2 - p'_1 = P_2 - P_1 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad [ 5.14 ]$$

La hauteur de béton de la sortie n'influence pas la différence de pression entre les 2 capteurs. Il n'y a que la pression due à la colonne de béton entre les deux capteurs qui influence la différence de pression. Peu importe si la flèche se vide ou pas dans la portion descendante, il n'y a donc pas d'influence sur la différence de pression entre ces deux capteurs. Pour chaque chantier, la configuration de la flèche a été relevée : la différence de hauteur entre les deux capteurs est donc connue.

L'Annexe L présente les différents chantiers où les données nécessaires pour cette analyse sont disponibles et les calculs présentant la pression prédite et la pression mesurée et corrigée pour l'effet de la gravité. Le relevé des configurations des flèches est présenté en détail à l'Annexe O.

La Figure 5.10 présente la comparaison entre la différence de pression prédite et la différence de pression mesurée. La différence de pression mesurée a été corrigée pour l'effet de la gravité avec l'équation [ 5.14 ]. Pour une majorité de chantiers, les différences de pressions prédites correspondent à celles mesurées. Pour trois chantiers (4, 13 et 15), les valeurs prédites sont réellement surestimées. Les valeurs des paramètres tribologiques (la viscosité d'interface) pour ces trois chantiers sont les plus. Il semble que pour ces chantiers, les paramètres tribologiques soient surestimés. Une erreur d'estimation de la configuration de la flèche n'est pas la source de l'erreur. Même en ajoutant une colonne 5 à 10 mètres de béton, ceci ne peut expliquer l'écart des valeurs prédites par rapport à celles mesurées.

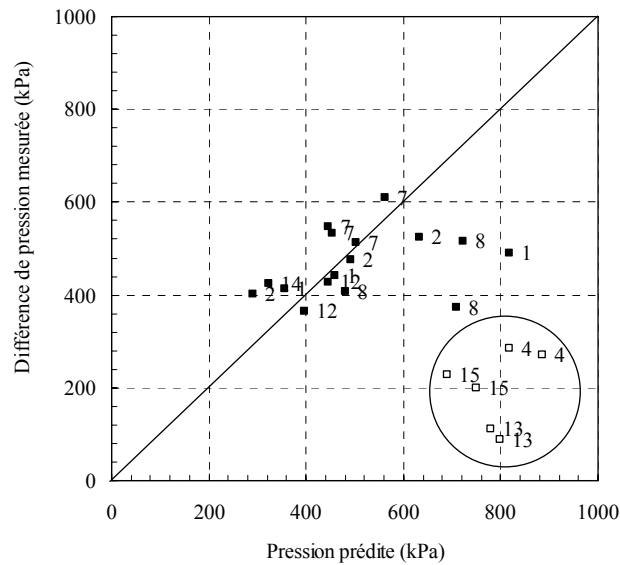


Figure 5.10 : Comparaison entre la différence de pression prédite et la différence de pression mesurée en tenant compte de la hauteur et des propriétés tribologiques

## 5.4 Prédiction de la courbe pression débit pour le circuit de chantier

À la section précédente, l'analyse de la friction couplée à l'effet de la hauteur a été présentée pour une section droite courte. Cette section présente la prédiction de la pression pour l'ensemble de la flèche. À la section précédente, certains chantiers n'ont pu être inclus dans l'analyse puisque le capteur 3 a subi des bris durant la campagne expérimentale. Dans la présente section des chantiers supplémentaires sont ajoutés à l'analyse.

La flèche complète du camion pompe comporte 45,64 mètres de section droite, 12 coudes de 90 degrés, 4 coudes de 45 degrés et 4 mètres de boyau souple. En tenant compte de l'effet de la gravité, on peut calculer la longueur totale correspondant aux pressions mesurées comparées aux pressions prédites par l'essai tribologique. Pour 12 coudes de 90 degrés et 4 coudes de 45 degrés, la longueur équivalente est de 5,6m. La longueur totale de la flèche incluant les coudes est de 51,24 m entre le capteur 1 et le capteur 5. Puisque le

capteur 5 a pratiquement toujours indiqué une pression nulle, la longueur de boyau souple n'est pas prise en compte.

L'Annexe N présente les données recueillies en chantier (pression au capteur 1, densité et débit) et les prédictions (pression à partir des données tribologiques, pression due à la hauteur de béton) y sont présentés.

En prenant pour hypothèse que les paramètres rhéologiques du béton n'ont que peu d'influence sur la forme de la courbe pression en fonction du débit (déjà discuté au chapitre précédent), la pression de pompage peut être prédite avec la première pente de l'équation de Kaplan. En chantier, les débits n'ont pas été mesurés mais plutôt estimés à partir des données recueillies sur le graphique de la mesure de la pression. Le débit estimé est alors un débit effectif lors de l'écoulement et non un débit moyen qui tient compte des périodes d'arrêt entre les coups de piston. Un  $K_r=1$  doit donc être utilisé dans l'équation de Kaplan pour tenir compte des hypothèses de bases établies. Avec :

$$P = \frac{2L}{R} \left( \tau_{0i} + \frac{Q_{eff}}{3600\pi R^2 k_r} \eta \right) \quad [ 5.15 ]$$

- où :
- P : Pression (Pa)
  - L : Longueur du boyau (m)
  - R : Rayon du boyau (m)
  - $Q_{eff}$  : Débit effectif lors de l'écoulement seulement en ( $m^3/h$ )
  - $K_r$  : Coefficient de remplissage
  - $\tau_{0i}$  : Seuil de l'interface (Pa)
  - $\eta$  : Viscosité de l'interface (Pas/m)

Pour comparer la pression due à la friction seul avec les pressions mesurées, ces dernières doivent être corrigée pour enlever l'effet de la gravité.

La Figure 5.11a présente un premier cas où on ne tient pas compte de la longueur des coudes ( $L=45,64$  m) alors que la Figure 5.11b présente celui où les coudes sont pris en compte ( $L = 51,24$  m). La première relation sous-estime un peu les pressions prédite (pente = 1,048) alors que la deuxième les surestime (pente = 0,9335).

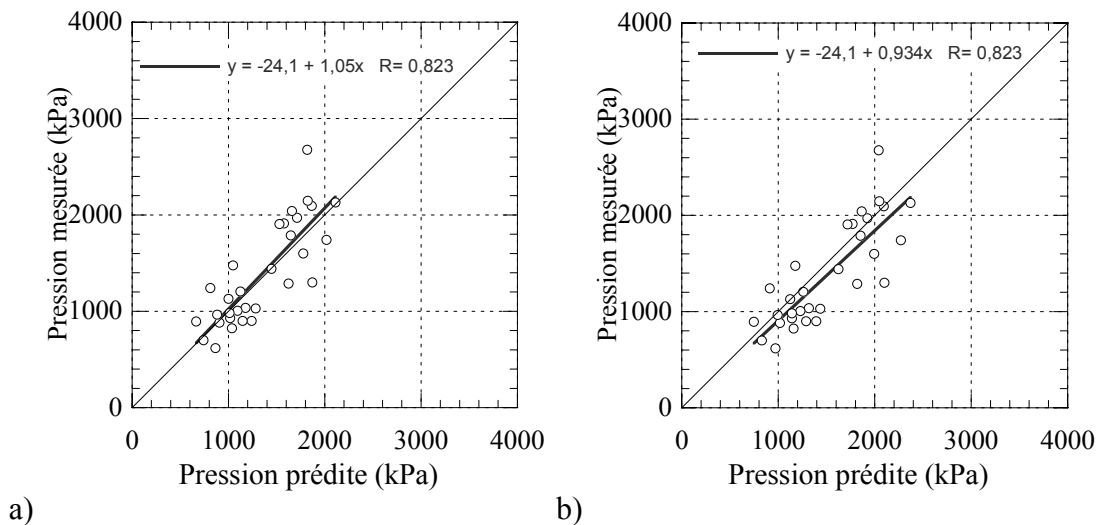


Figure 5.11 : Prédiction de la pression de pompage pour la flèche complète sans considérer les coudes (a) et en considérant les coudes (b)

Les prédictions des pressions présentées à la Figure 5.11 montrent une dispersion des résultats un peu plus élevée que dans le cas du modèle présenté pour le circuit de laboratoire. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cette dispersion outre la difficulté de réaliser des essais en chantier. Un des phénomènes les plus probables est une erreur lors de l'estimation de la hauteur de la flèche du camion ce qui fausse l'évaluation de l'effet de la gravité. À la section 5.3, il a été présenté que le béton dans la portion descendante n'était pas toujours en charge. Pendant les opérations de pompage, il est très possible que la conduite descendante cesse d'être en charge avant d'atteindre la sortie. L'hypothèse de base est qu'à la sortie de la pompe, la pression est nulle. D'ailleurs, le capteur 5 placé à la fin de

la section 4 de la flèche, tout juste en amont de la section courte en caoutchouc a pratiquement toujours indiqué des pressions nulles à cet endroit ce qui vérifie cette hypothèse.

## **5.5 Relation entre les paramètres rhéologiques et les paramètres tribologiques**

Cette section présente une comparaison entre les propriétés rhéologiques et tribologiques. Dans le cadre de cette étude sur la pompabilité, les principales variables de formulation des mélanges présentés sont le volume de pâte de liant et le type de liant et deux mélanges ont un rapport E/L élevé, soit 0,65 et les autres mélange ont un rapport E/L égale à 0,40. La Figure 5.12a montre la relation entre le seuil de l'interface et le seuil de cisaillement de ces mélanges et la Figure 5.12b montre la relation entre la viscosité d'interface et la viscosité plastique. Pour ce groupe de mélanges de béton, les propriétés d'interface et les propriétés rhéologiques semblent être en relation. Le béton est une structure granulaire dont l'écoulement global est régi par l'écoulement de la pâte entre les granulats. Les propriétés rhéologiques de la pâte ainsi que le volume de la pâte (indirectement la proximité des granulats) influencent les propriétés rhéologiques du béton alors que ce sont les propriétés seules de la pâte qui influencent les propriétés d'interface. Selon cette logique, il ne devrait pas y avoir de relation entre les propriétés de l'interface et les propriétés rhéologiques.

D'ailleurs, le mélange T10-3-440, possède un affaissement plus faible et est exclus de la relation comparative des seuils. Par contre, pour ce qui est de sa viscosité, elle demeure incluse dans le domaine étudié.

Les deux mélanges ST-2-450 et ST-2h-330 qui ont déjà posé problème lors de l'analyse, demeurent hors relation pour ce qui est de la comparaison entre les seuils de l'interface et seuils de cisaillement.



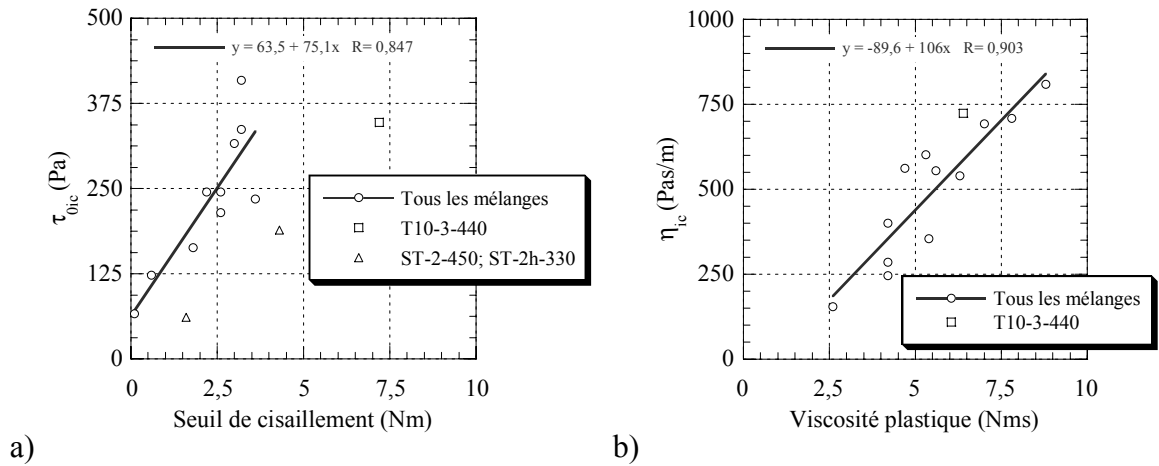


Figure 5.12 : Comparaison entre les paramètres tribologiques et rhéologiques

Les Figure 5.13a et Figure 5.13b montre une étude comparative des propriétés tribologiques et des propriétés rhéologiques pour une autre campagne d'essais impliquant des bétons fabriqués selon les variables suivantes :

- Quatre types de liants;
- Rapport E/L;
- Rapport S/(S+G);
- Volume de pâte.

Les formulations complètes de tous ces mélanges sont présentées en Annexe B (Campagne exploratoire présentée à la section 2.5).

La relation pour les seuils semble bonne jusqu'à la limite d'environ 4,8 Nm. Au-delà de cette limite, les mélanges de béton peuvent avoir un seuil tribologique plus faible même si le seuil de cisaillement est élevé. La Figure 5.13b montre la relation entre la viscosité plastique et la viscosité d'interface mesurée avec le tribomètre en caoutchouc. Une droite a été tracée, mais la corrélation  $R^2=0,41$  montre indique que la relation est peu concluante. Visuellement, on observe pratiquement un nuage de points plutôt qu'une relation précise.

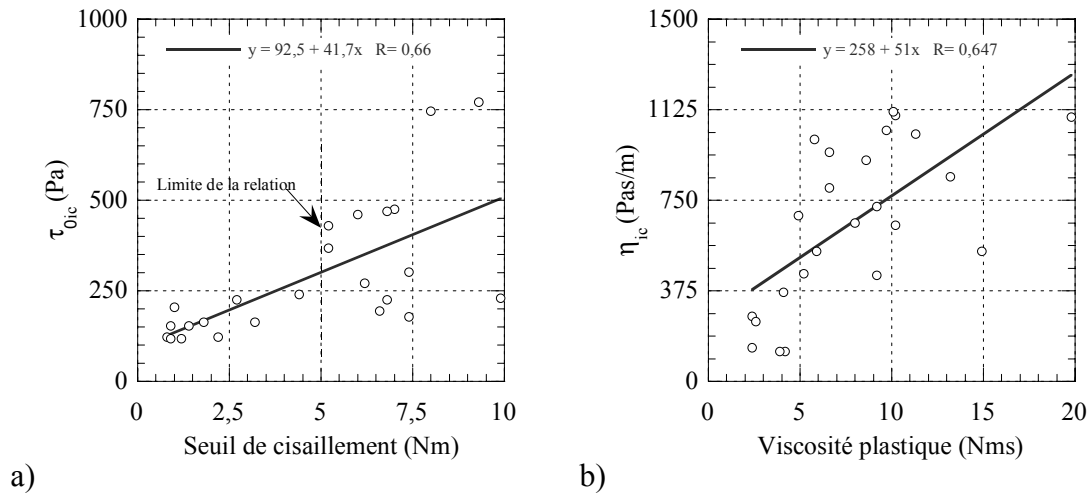


Figure 5.13 : Relations entre les propriétés tribologiques et rhéologiques pour les mélanges de béton de la série préliminaire

Les données présentées montrent qu'il y a une certaine relation entre les paramètres rhéologiques et tribologiques seulement lorsque peu de variables sont impliquées. Pour les seuils, dans les deux cas présentés, il semble y avoir une relation jusqu'à environ 4,8 Nm. Lorsque le seuil de cisaillement du béton dépasse cette valeur, le seuil de l'interface ne peut être déduit.

## 5.6 Relation entre le coefficient de remplissage et les propriétés rhéologiques

Pour établir un modèle prédictif de la pression de pompage précis, il est nécessaire de pouvoir inclure le coefficient de remplissage des pistons de refoulement. En effet, lorsqu'un  $kr$  fixe non variable est utilisé, il a été montré (section 5.1) que le modèle ne correspondait pas aux mesures réelles. Le changement de courbure, lorsque les mesures réelles sont présentées, se présente dans le sens opposé au modèle. Il a été montré que ce changement de courbure était dû au  $kr$  qui diminue lorsque la cadence de pompage augmente.

Le coefficient de remplissage des cylindres de refoulement est fonction de la vitesse de pompage (voir Figure 3.15). Pour un même mélange de béton pompé à différentes vitesses le coefficient de remplissage varie. Pour prédire le coefficient de remplissage il faut donc inclure un terme qui tient compte de la vitesse de pompage ou de la cadence des pistons. Le temps moyen de déplacement du piston est une variable connue puisque l'opérateur de pompe peut le changer. Le temps effectif par contre est une variable inconnue (c'est ce que l'on cherche indirectement par le coefficient de remplissage).

En posant comme hypothèse de base que le coefficient de remplissage mesuré à partir des courbes de pression de pompage ( $K_{\text{eff}}$  précédemment défini) est fonction des propriétés rhéologiques du béton, une formule empirique a été développée par tâtonnement pour estimer un coefficient de remplissage rhéologique (CRR). Le CRR a été obtenu, en ajustant le poids relatif entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Un facteur multiplicatif de 1,5 pour la viscosité plastique donne la meilleure corrélation répondant à l'équation :

$$CRR = G + 1,5 \cdot H \frac{1}{T_{\text{moy}}} \quad [ 5.16 ]$$

La Figure 5.14 montre la relation entre le de remplissage mesuré ( $K_{\text{eff}}$ ) et le coefficient de remplissage rhéologique (CRR). On constate que deux mélanges de béton sont en dehors de la relation (LT-2-450 et ST-1-500). Outre ces quelques points qui demeurent inexpliqués pour l'instant, une relation relativement linéaire existe entre le coefficient de remplissage estimé à partir des paramètres rhéologiques et le coefficient de remplissage estimé à partir des courbes de pression de pompage.

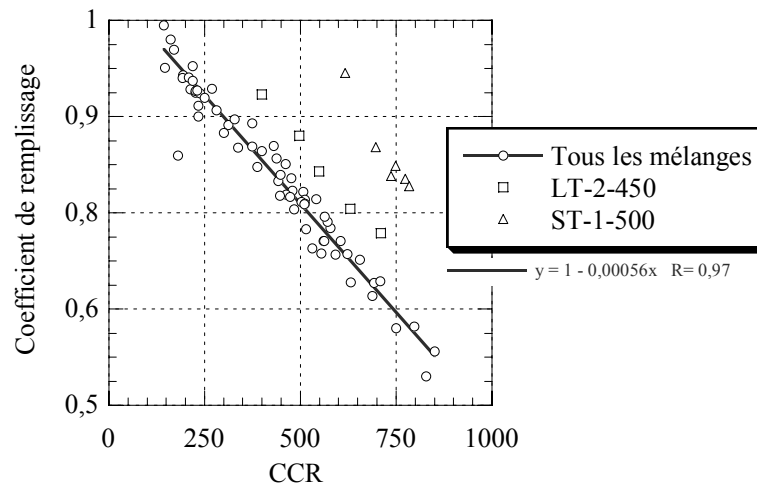


Figure 5.14 : Prédiction du coefficient de remplissage à partir des paramètres rhéologiques

On peut donc estimer le coefficient de remplissage à partir des valeurs des propriétés rhéologiques. Il est fort probable que la relation empirique présentée ici est propre à la pompe utilisée. Il serait intéressant de vérifier cette conclusion sur d'autres géométries de pompe. Aussi, ce type de relation est nécessaire pour établir un modèle prédictif des pressions qui tiennent compte du débit moyen souhaité et non du débit effectif qui ne tient pas compte des courts temps d'arrêts entre les coups de piston. La forme de la trémie, le volume de béton réellement occupé dans la trémie et l'utilisation de l'agitateur dans la trémie sont aussi d'autres facteurs qui peuvent modifier le coefficient de remplissage des pistons.



## Conclusion

Les buts visés par cette thèse étaient de développer et d'étudier deux configurations de tribomètre soit un premier à interface caoutchouc-béton et un deuxième à interface acier-béton, d'étudier les liants binaires et ternaires commercialement disponibles et de valider un modèle de prédiction de la pression de pompage pour deux circuits de pompage (un premier à boyaux souples de caoutchouc en laboratoire et un deuxième en conduites rigides en acier montées sur une flèche en chantier). Le modèle devait inclure les réducteurs, les coudes et l'effet de la hauteur.

Pour étudier la mobilité du béton, deux campagnes expérimentales ont été réalisées. Une première a eu lieu en laboratoire et une seconde en chantier. Lors de ces campagnes expérimentales, en plus d'étudier l'effet des différents types de liant et l'effet de certains adjuvants, les données étaient recueillies pour valider un modèle de prédictions des pressions de pompage basé sur les résultats d'essais rhéologique et tribologique.

La première campagne d'essais menée en laboratoire sur un circuit de pompage composé de 15 mètres boyaux souples de 50 mm de diamètre a permis d'étudier les liants avec fumée de silice et les liants ternaires à base de cendres volantes ou de laitiers de haut fourneaux. Le volume de pâte et le rapport E/L étaient aussi variables. Cette campagne a permis de valider l'essai tribologique à interface caoutchouc-béton.

Les résultats de la campagne en laboratoire ont permis de montrer que :

- L'utilisation de liant ternaire en remplacement d'un liant type 10 à masse comparable permet d'améliorer le pompage du béton. C'est principalement la plus faible densité du liant ternaire qui augmente le volume de pâte dans le mélange de béton, ce qui facilite le pompage;
- Un rapport E/L de 0,65 diminue grandement les pressions de pompage mais un pic très prononcé sur la courbe de pression, correspondant au début de la poussée du piston, montre que ces mélanges sont beaucoup plus instables que les mélanges de rapport E/L de 0,40;

- L'utilisation de l'air entraîné peut diminuer les pressions de pompage si un volume suffisant de pâte est contenu dans le mélange de béton recalculé en ne tenant pas compte du volume d'air. Le volume d'air est pratiquement nul lorsque le béton est sous pression dans les boyaux et il ne doit pas être calculé.
- Il existe, pour un certain squelette granulaire donné, un minimum de pâte que doit contenir le mélange de béton pour qu'il y ait pompage. Pour les mélanges étudiés dans cette étude, ce minimum était de 30%. Lorsque les volumes de pâtes sont augmentés, les pressions de pompages diminuent.

Lors de cette campagne, un réducteur passant de 100 mm à 50 mm a été étudié. La perte de charge supplémentaire prévue associée au réducteur n'a pas été démontrée clairement. Il semble plutôt que ce soit le plus faible diamètre et les boyaux en aval qui provoquent une pression de pompage plus élevée. Les boyaux de plus petits diamètres provoquent une vitesse plus élevée pour un même débit et donc une plus grande perte de charge. Pour réduire la pression de pompage, il faut donc préférentiellement utiliser un réducteur le plus loin possible de la pompe. Par contre, en pratique, les réducteurs sont placés près de la pompe pour favoriser le blocage à cet endroit pour éviter de devoir démonter tous les boyaux fixés à la flèche par exemple.

La deuxième campagne d'essais s'est déroulée en chantier. Un camion pompe muni d'une flèche de 42m a été instrumenté de cinq capteurs de pression. Cette campagne avait pour but de valider l'essai tribologique à interface acier-béton, d'étudier l'effet de la hauteur et l'effet des coudes sur les pressions de pompage. Les essais ont montrés que les coudes augmentent les pressions nécessaires au pompage. La longueur équivalente du coude est la longueur de son arc de cercle au centre de la conduite. En réalité, la pression supplémentaire associée au coude n'est que la friction associée aux parois.

Pour tenir compte de l'effet de la gravité lors d'opérations de pompage en hauteur, les calculs standard d'hydraulique ont été confirmés. La difficulté à intégrer un terme de hauteur au modèle de prédiction des pressions de pompage s'explique par la difficulté à déterminer quelles portions du circuit de pompage demeurent en charge. Lors de la

campagne d'essais avec le camion pompe, à l'arrêt des opérations de pompage, la portion de la flèche descendante se vidait systématiquement. Il demeure une pression statique à la sortie de la pompe fonction de la hauteur de béton. Lors du pompage, la portion descendante demeure en général pleine de béton et dans ces cas, c'est la hauteur entre la pompe et la sortie de la flèche qui doit être prise en compte pour l'ajout de la pression supplémentaire associée à la hauteur de béton.

Le domaine des bétons à air entraîné contenant un volume d'air supérieur à 6 ou 7% n'a pas été étudié clairement. Les quelques mélanges de béton qui ont été étudiés avec de l'air entraîné ont montré un plateau de pompage plus court puisque la montée en pression servait en grande partie à compresser l'air présent dans le béton. Les mesures tribologiques ont montré des résultats étranges et cet aspect demeure obscur. Il semble logique que la mesure de la viscosité au rhéomètre ne soit pas la mesure idéale puisque l'air entraîné diminue beaucoup la viscosité plastique. L'air étant comprimé en grande partie lors des opérations de pompage, les propriétés rhéologiques ne sont plus les mêmes dans le boyau. Il faudrait pouvoir mesurer les propriétés rhéologiques et/ou tribologiques pour le mélange de béton semblable mais ne contenant pas d'air. Par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser le modèle de prédiction de la pression de pompage avec des mélanges contenant de l'air entraîné.

Le modèle de Kaplan a été validé. Pour le circuit de laboratoire avec des boyaux en caoutchouc, la deuxième portion de la pente de ce modèle a parfois été observée à de très grands débits de pompage. Ce modèle bi-phase présente certaines difficultés d'applications. Entre autre, même si les propriétés tribologiques de l'interface boyau béton sont déterminantes, il faut néanmoins mesurer les propriétés rhéologiques et déterminer s'il y a présence de cisaillement dans le béton. La deuxième difficulté est rencontrée lors de la détermination du débit réel puisqu'il faut alors supposer un coefficient de remplissage. Les résultats ont montrés que le coefficient de remplissage varie en fonction de la cadence des pistons de refoulement de la pompe. Bien qu'un modèle empirique ait été présenté pour déterminer le coefficient de remplissage, il ne peut être utilisé réellement en dehors des données de laboratoire. Pour présenter un modèle de prédiction de la pression de pompage, l'effet du coefficient de remplissage doit être maîtrisé parfaitement d'autant plus qu'il est



présent sur les deux portions de droite du modèle. Des études supplémentaires seraient nécessaires pour déterminer une méthode de prédiction du coefficient de remplissage.

Il semble que malgré tout, le débit par glissement soit prépondérant. Les résultats de l'essai tribologique ne montrent pas de cisaillement dans le béton. Une utilisation simplifiée du modèle pourrait être envisagée en n'utilisant que la première partie (première droite) du modèle. Pour des débits de pompage usuels, l'erreur principale demeurerait au niveau de l'estimation du coefficient de remplissage. Aussi, en chantier, comme la hauteur est variable et les propriétés du béton frais sont aussi variables d'un camion à l'autre, une telle approximation serait justifiée.

Plusieurs aspects du pompage n'ont pas été abordés dans cette thèse. Notamment, les aspects sur la stabilité n'ont pas été abordés. Certains résultats montrent bien un pic au début de la courbe de pression mesurée. Un rapport E/L élevé ou un trop grand volume de pâte provoque ce pic. Différents moyens d'augmenter la viscosité de la pâte de liant pourraient probablement diminuer cet effet. Différents moyens tel qu'augmenter la teneur en particules fines ou ajouter des agents de viscosité pourraient procurer cet effet. Cet aspect fait partie d'un sujet de recherche en parallèle de cette thèse.

L'effet des particules fines n'a pas été étudié dans cette thèse. Beaucoup d'indices laissent croire qu'à partir d'une certaine dimension, les particules fines améliorent les propriétés de pompage. L'inclusion de particules fines pourrait servir à augmenter le volume de pâte utile au pompage.

## Bibliographie

ACI 304.2R, *Placing Concrete by Pumping Methods*, ACI Material Journal, july-august, 1995, pp. 441-464

Alekseev A.N. (1952) *On the calculation of resistance in Pipe of Concrete Pumps*, Mekhanizatia Stroitel'sta (Moscow), vol. 9, No. 1, Janvier 1952, pp. 8-13, traduit comme Library Communication no. 450, Building Research Station, Garston-Warford, avril 1963

Anderson W.G. (1977), *Analyzing Concrete Mixtures for Pumpability*, Journal of the American Concrete Institute, vol.74, no. 9, sept., pp. 447-451

Bain, A.G., Bonnington, S.T. (1970), *The Hydraulic Transport of Solids by Pipeline*, Pergamon Press, Oxford, 251 p.

Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., de Larard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik, J.O., *Comparison of concrete rheometers : International tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000*, National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U.S. Department of Commerce, Editors : Chiara F. Ferraris, Lynn E. Brower, NISTR 6819, Sept. 2001, 147 p.

Bartos, P. (1992), *Fresh Concrete, Properties and Tests*, Elsevier, Amsterdam, 292 p.

Beaupré, D. (1994) *Rheology of High Performance Shotcrete*, Ph.D. Thesis of the University of British Columbia, Canada, 249 p.

Beaupré, D., Chapdelaine, F., Molez, L., Bissonnette, B., *Polyolefin fiber reinforced shotcrete as a repair material – Technical report*, CRIB, université Laval, 127 p.

- Best, J., Lane R., (1960) *Testing for Optimum Pumpability of Concrete*, Concrete International, Oct, vol. 2, No. 10, pp. 9-17
- Boulet, D. (1997) Influence du pompage sur les caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton, Mémoire de maîtrise, université Laval, 172 p.
- Browne, R.D., Bamforthe, P.B. (1977) *Tests to Establish Concrete Pumpability*, ACI Journal, Vol. 74, No. 5, May, pp. 193-207
- Chapdelaine, F., (1998) *Étude sur la mesure de la rhéologie du béton frais*, mémoire de maîtrise, université Laval, 126 p.
- Chouinard, B. (1998) *Étude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité*, Mémoire de maîtrise, université Laval, août, 217 p.
- Dawson, O, (1949) *Pumping Concrete – Friction between Concrete and Pipeline*, Magazine of Concrete Research, London, V1 No 3, dec. 1949, pp. 135-140
- De Larrard, F, Szitkar, J.C., Hu, C. (1993), *Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides*, Bulletin de liaison LCPC, no. 186, juil-août, pp. 55-59
- De Larrard, F., Hu, C., Sedran, T. (1997), A New Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete, ACI Material Journal, vol.94, no.3, mai-juin, pp.234-243
- De Larrard, F. (1999) *Concrete Mixture Proportionning – A scientific approach*, E&FN Spon, London, 421 p.
- Dyer, R.M. (1991) An investigation of Concrete Pumping and Effects of Pressure on the Air Void System of Concrete, Master thesis, university of Washington, 222 p.
- Ede, A.N. (1967), *The resistance of concrete pumped through pipelines*, Magazine of Concrete research, vol 9, no. 27, nov, 1967, pp. 129-140

- Elkey, W., Janssen, D.J., Hover, K.C. (1994), *Concrete pumping effects on entrained air-voids*, Final report to Washington State Transportation Center, June, 97p.
- 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
- Hashimoto, C., Maruyama, K., Shimizu, K. (1988) *Electric measurement system for prediction of blocking of fresh concrete flowing in pipes*, Third International Symposium on Liquid-Solid Flows, American Society of Mechanical Engineers, New-York, vol.75, dec, pp.189-194
- Hover, K.C. (1989) *Some Recent Problems with Air-Entrained Concrete*, Cement, concrete, and aggregates, Vol. 11, No. 1, pp. 67-72
- Hu, C. (1995) *Rhéologie des bétons fluides*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 202 p.
- Illingworth, J.R. (1972), *Movement and Distribution of Concrete*, McGraw-Hill, Londres, pp. 131-170
- Johansson, A., Tuutti, K. (1976), *Pumped concrete and pumping concrete*, CBI Research Reports, 10:76 (Swedish Cement and Concrete Inst.)
- Kaplan, D. (2000) *Pompage des bétons*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 225 p.

Kempster, E. (1969), *Pumpable Concrete*, Current Paper No. 29/69, Building Research Station, Garston, aug. 1969.

LCPC (2002), *Pompage des bétons – Guide technique*, mars 2002, ISBN 2-7208-3106-9

Loadwick, F. (1970) *Some Factors Affecting the Flow of Concrete Through Pipelines*, Proceeding of the First International Conference on Hydraulic Transport of Solids in Pipes, British Hydromechanics Association, Bedford, pp. D1-1 – D1-31

Morinaga, M. (1973), *Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines*, Fresh Concrete : Important Properties and heir Measurement, Proceeding of a RILEM Seminar Held March, Leeds, vol. 7, pp.7.3-1 à 7.3-39.

Murata, J. (1984) *Flow and deformation of fresh concrete*, Materials and Structures, vol.17, no.98, march-apr, pp. 117-129

Neville, A.M. (1995) *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Longman Group Limited, London, 844 p.

Neville, A.M., Brooks, J.J. (1990), *Concrete Technology*, Longman Scientific & Technical, England, 438 p.

Powers, T.C. (1968) *The Properties of Fresh Concrete*, Wiley & Sons, 664 p.

Ragan, Steven A., (1981), *Evaluation of tests for determining the pumpability of concrete mixtures*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, miscellaneous paper SL-81-29, Vicksburg, Miss., 1981, 36 p.

Roy, D.M.; Skalny, J.; Diamond, S. (1982) *Effects of bleeding Materials on the Rheology of Cement Pastes and Concretes*, Effect of Surface and Colloid Phenomena on

Properties of Fresh Concrete, Proceedings, Symposium M, Material Research Society, november 1-4.

Sakuta, M., Yamane, S., Kasami, H., Sakamoto, A (1979) *Pumpability and Rheological Properties of Fresh Concrete*, Proceedings of Conference on Quality Control of Concrete Structures, vol.2, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, june 17-19, pp.125-132

Saucier, K.L. (1977) *Discussion, Tests to Establish Concrete Pumpability*, Journal of the American Concrete Institute, vol.74, no.11, nov, pp. 563-565

Sedran, T. (1999) *Rheologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants*, Thèse de l'ENPC, 220 p, Mars, 1999.

Schwing (1983), Pumping, *Concrete and Concrete Pumps – A concrete placing manual*, by Karl Ernst v. Eckardstein, 133 p.

Shilstone, J.M.Sr (1990) *Concrete Mixture Optimization*, Concrete international, Vol. 12, No. 6, June, pp. 33-39.

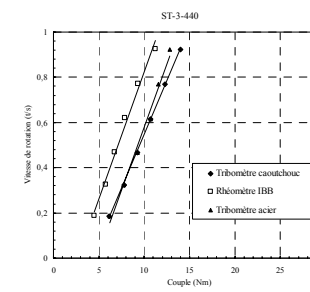
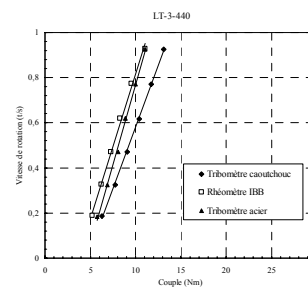
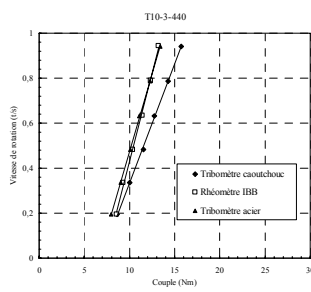
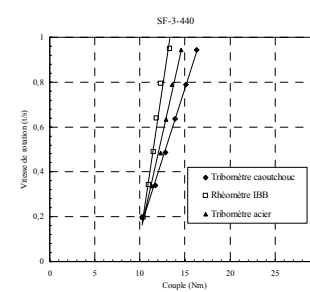
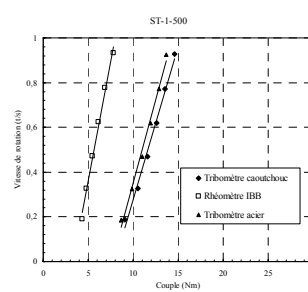
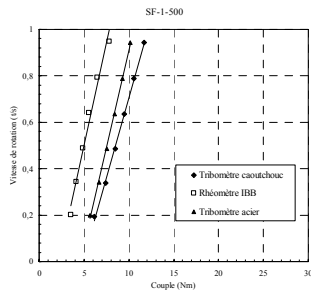
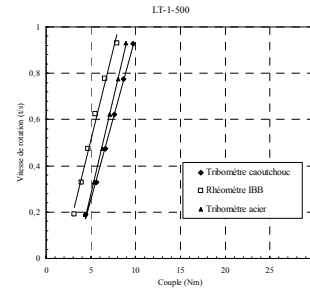
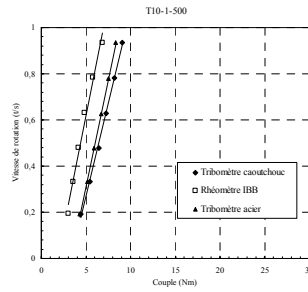
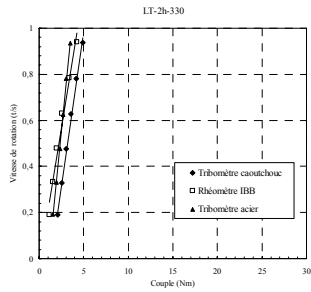
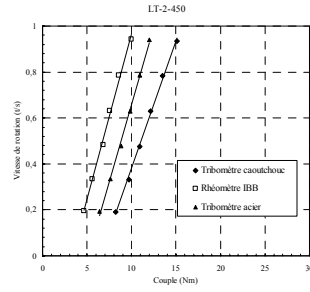
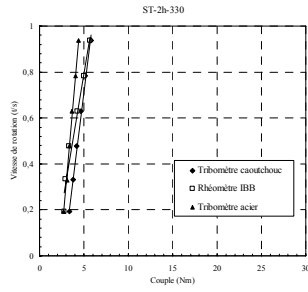
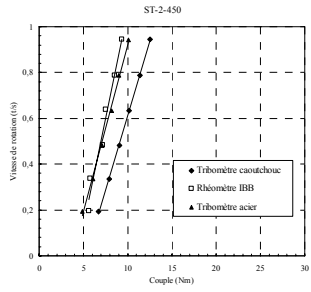
Tattersall, G.H. (1973) *Lubrication Layer in Concrete Pumping – A Written Contribution to Discussion Topic Number 7*, Fresh Concrete: Important Properties and Their Measurement – Proceedings of a RILEM Seminar Held on 22<sup>nd</sup> – 24<sup>th</sup> March 1973 in Leeds England, vol.3, University of Leeds, Leeds, England, pp. 7.D1-1 – 7.D1-5

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

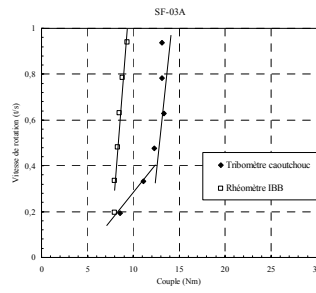
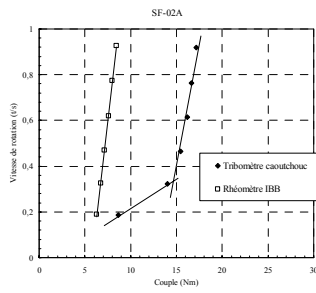
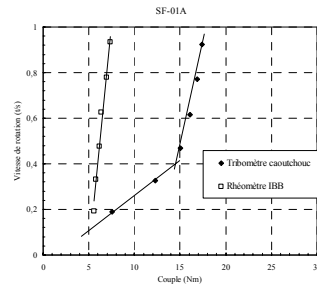
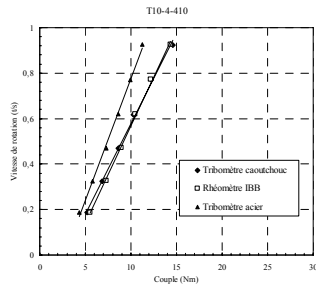
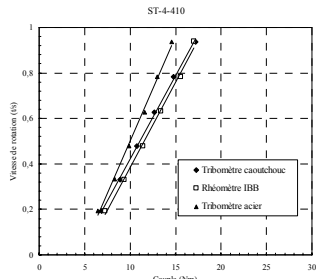
Tattersall, G.H., Baker, P.H. (1989) *An investigation on the effect of vibration on the workability of fresh concrete using a vertical pipe apparatus*, Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No. 146, march, 1989, pp.3-9

- Tattersall, G.H. (1991) *Workability and Quality Control of Concrete*, London, E & FNSPON, 1991, 262 p.
- Tobin, Robert E. (1972) *Hydraulic Theory of Concrete Pumping*, ACI Journal Proceedings V.69, No.8, aug. 1972, pp. 505-510
- Wallevik, O.H., Gjorv, O.V. (1990) *Practical Description of the Rheology of Fresh Concrete*, Report BML 90.602, Division of Building Material, The Norwegian Institute of Technology, NTH, Trondheim, 13 p.
- Weber, R. (1963) *The transport of concrete by pipeline*, Cement and Concrete Association Library Translation No. 129, Cement and Concrete Association, Londres, 1963, 85 p.
- Yingling, J, Mullings, G.M., Gaynor, R.D. (1992) *Loss of air in Pumped Concrete*, Concrete International, vol.11, no.10, oct., pp. 57-61

# Annexe A Courbes tribologiques et rhéologiques

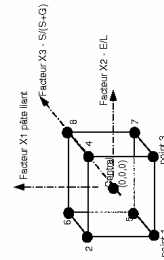






# Annexe B Formulations et propriétés des mélanges de béton pour la campagne exploratoire

Nom mélange	No exp.	Liant (kg)	Eau (m³) (lsg)	Sable (m³) (lsg)	Pierre (lsg)	Air (%)	E/L	S/(S+S)	Pâte avec air/Pâte sans air/taux de ciment		H	Tribomètre		Tribomètre Cas	Ha		
									(%)	(mm)		G	Csc			Hic	
Ter.Sr.Lau.																	
22020201	1	425,61	122,19	1068,41	712,57	4,5	0,35	0,60	34,0	220	6,6	10,2	3,8	14,3	3,8	11,0	
22020202	2	380,37	179,80	912,62	616,39	3,1	0,30	0,60	33,4	40,3	9,3	4,9	13,1	8,9	11,6	11,0	
22020203	3	471,89	136,39	1023,94	616,39	2,6	0,30	0,60	40,0	20,0	2,2	3,9	2,4	7,5	2,8	2,8	
22020204	4	471,89	235,36	923,66	616,39	2,1	0,35	0,40	42,3	39,9	2,0	2,0	2,0	13,3	2,6	10,2	
22020205	5	435,11	156,24	799,29	1098,58	2,1	0,35	0,40	32,3	30,2	0,8	11,3	2,0	13,3	2,6	10,2	
22020206	6	578,30	192,49	617,93	927,21	2,6	0,35	0,40	42,3	40,2	7,5	8,0	6,6	14,6	10,4	10,9	
22020207	7	356,39	166,48	726,95	1090,30	2,6	0,30	0,40	32,7	30,1	7,0	5,2	10,2	7,2	8,4	6,6	
22020208	8	480,90	230,29	623,12	938,01	1,5	0,30	0,40	42,1	40,6	1,0	4,1	4,0	4,8	3,4	3,8	
T10																	
07110109	1	433,24	147,62	1042,44	696,88	6,5	0,35	0,60	35,6	29,1	200	7,4	9,7	3,5	13,5	2,4	10,7
07110110	2	589,72	203,41	906,95	606,31	4,4	0,35	0,60	44,0	39,6	140	6,0	6,6	9,0	12,3	9,0	9,8
07110111	3	353,69	174,29	1050,38	702,19	5,8	0,31	0,60	35,1	29,3	80	6,2	5,2	5,3	4,3	4,8	4,8
07110112	4	496,95	244,66	936,14	623,82	1,4	0,30	0,60	42,1	40,7	>230	1,2	2,4	2,3	1,8	2,2	2,2
14110113	5	444,35	140,71	713,38	1071,87	4,1	0,35	0,40	33,9	29,8	220	3,2	3,2	11,0	3,6	9,4	9,4
14110114	6	603,16	197,70	616,54	927,79	2,5	0,35	0,40	42,8	40,3	150	5,2	9,2	8,4	9,4	7,2	8,8
14110115	7	364,33	177,20	717,03	1078,58	2,6	0,33	0,40	33,5	30,9	150	2,7	9,2	4,4	5,7	4,7	4,3
14110116	8	495,89	234,85	623,39	936,46	1,6	0,30	0,40	42,2	40,6	>230	1,4	4,2	3,0	1,6	2,6	2,0
141101C02	centre	468,49	182,10	829,23	832,25	3,5	0,43	0,50	38,5	35,0	190	3,4	6,0	5,8	4,8	4,8	5,0
Ter.Lat.																	
07110101	1	426,97	139,39	1044,83	699,04	7,0	0,34	0,60	35,4	28,4	130	9,9	10,1	4,5	14,5	4,2	12,4
07110102	2	585,58	202,32	909,44	607,98	4,0	0,35	0,60	43,8	39,8	80	7,0	5,8	9,3	13,0	8,8	10,6
07110103	3	363,31	181,66	1085,40	723,60	3,0	0,30	0,60	33,0	30,0	140	6,8	8,0	4,4	8,5	3,6	6,0
07110104	4	483,31	238,84	920,23	613,19	3,0	0,30	0,60	43,1	40,1	220	1,8	2,6	3,2	3,2	3,0	3,0
14110105	5	443,96	158,39	723,66	1085,41	4	0,35	0,4	33,69	29,69	140	7,4	19,3	5,9	14,2	6,1	12
14110106	6	609,80	202,31	548,79	949,41	3,20	0,35	0,37	44,51	41,31	140	6,8	8,6	9,2	11,9	7,7	10
14110107	7	363,88	166,92	722,73	1087,14	2,80	0,30	0,40	32,97	30,17	90	4,4	14,9	4,7	7	4,5	5,9
14110108	8	484,42	242,21	615,60	923,40	3,00	0,30	0,40	43,00	40,00	>230	0,9	3,9	2,3	1,6	2,2	4,8
COI	centre	462,19	175,10	826,81	829,83	3,80	0,43	0,50	38,64	34,84	180	3,8	7,3	4,3	7,6	4,2	6,4



# Annexe C Fiche technique de la pompe de laboratoire

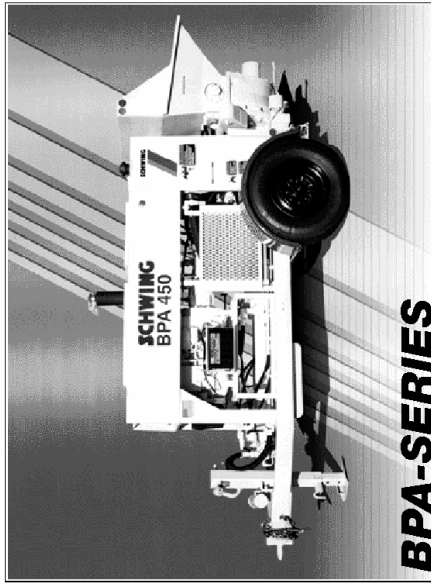


**SCHWING AMERICA INC.**  
LINE PUMPS

## BPA-450 / BPA-500

Multi-Duty Pumps:

- Concrete
- Shotcrete
- Grout



## BPA-SERIES

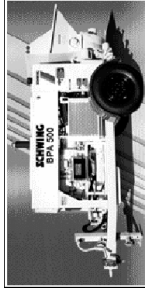
- BPA 450**  
**BPA 500**
- Output to 45 y<sup>3</sup>/hr
  - Pressure to 1100 psi
  - Up to 70 horsepower

Here are the multi-duty pumps for handling structural concrete, grout or shotcrete. All the reliability of Schwing's agitator pumps in a smaller package for all concrete viscosity. The BPA 500 pumps are available in a larger package for high capacity applications per minute resulting in higher output. (Optional agitator assembly shown)

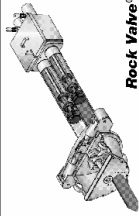
## BPA-450 / BPA-500

Technical Data		BPA450 / BPA 500	
	U.S. Metric	U.S. Metric	
Concrete Output: Eu (m <sup>3</sup> /hr) (1)	35 / 26	45 / 35	
Max. Pressure on Concrete (psi) (2)	100	69	100
Concrete Discharge Height (ft) (3)	110	33	110
Max. Vertical Pumping Distance (ft) (4)	300	100	300
Max. Pump Stroke/Min.	2/60-240	32-540/500	
Max. Aggregate Size (in) (5)	1 / 2.5	1 / 2.5	
Concrete Valve Type	Rock	Rock	
Concrete Cylinder Diameter (mm) (6)	100	100	100
Concrete Cylinder Stroke Length (mm) (7)	39	100	39
Differential Cylinder Diameter (mm) (8)	5.14	5.0	5.14
Differential Cylinder Length (mm) (9)	39	100	39
Max. Concrete Discharge Rate (m <sup>3</sup> /hr) (10)	11	11	11
Max. Concrete Discharge Rate (yd <sup>3</sup> /hr) (11)	1.3	1.3	1.3
Output (m <sup>3</sup> /hr) (12)	46	10.19	46
Engine Model/Phase	Deutz BF4L011F		
Engine Power (hp) (13)	66	49	70
Electric Consumption (kWh) (14)	80	85	80
Dimensions (mm) (15)			
System #1	Concrete Pump		
System #2	Truck Chassis		
System #3	Agitator		
Hydraulic Circuit #1	Aut. Presh. With 1/2" Discharge and 1/2" Out. with 1/2" Inlet		
System #2	Aut. Presh. Variable Displacement		
System #3	Open Drive, Fixed Displacement		
Hydraulic Tank Capacity	50	159	50
Pump Tank Capacity (gal) (17)	20	75	20
Weight (kg) (18)	166	422	166
Height (m) (19)	66	195	66
Trailer Units Weight (kg) (20)	500	2272	500
Trailer Units Weight (lb) (21)	1100	5000	1100
Wheels (Per Side) (22)	100	1	100

\*Pumping distances shown are to be used as a guide only, since they have been computed on the basis of a concrete viscosity of 180 cP. Actual pumping distances will vary with concrete viscosity and aggregate size. Maximum height and distance shown for reference only. Pump specifications for each model. Other units are available. Specifications subject to change without notice.



Ask any Schwing owner about the unmatched back-up in parts and service that you can expect from the leader in the concrete industry. More concrete is pumped through Schwing units than any other brand because we are there to support our customers with knowledge and service.



### Rock Valve®

The patented Rock Valve has pumped more concrete than any other type of valve. Over 100 years of experience and a year for maintenance and long term reliability with the Rock Valve. Proof of performance of this valve is millions of yards successfully placed.



Represented by

**SCHWING AMERICA INC.**  
LINE PUMPS  
ISO 9002

1300 Crestview Road  
Marietta, GA 30062  
800-237-8860  
678-580-9801

FAX 678-580-1289  
www.schwing.com

Printed on Recycled Paper

01002-5000

# Annexe D Fiche technique des capteurs de pression

during installation. Use of a lubricant is recommended. Hand tightening is usually sufficient to seal liquids up to 20,000 psi and dry mounting surface finish is adequate (32 microinches or better).

Although the PX102 transducers are rugged, they should not be handled carelessly. Do not bend or kink the cable, or pull on the cable or bending it sharply where it is attached to the transducer. Avoid striking, scratching, or denting the diaphragm particularly on low range units. Also note that it is possible to apply enough pressure to the diaphragm with the thumb to puncture low range units.

**Protective Cap**  
Each transducer is shipped with a protective cap which should be removed before installation.

**Maintenance**  
The maintenance is required with these transducers. The transducers are rugged and reliable. Some precaution in handling them is necessary, particularly in the low pressure ranges. Do not press on the diaphragm unless the unit is attached to a pressure source. The transducer should be protected from nicks, scratches and dents. The protective cap should remain on the unit until it is ready for installation. It is important that the insulation resistance of the electrical circuit be maintained. Moisture, dirt or contaminated oils at the solder connections may be a source of trouble. It is important that the cable remains free from punctures and abrasions. The cable should be protected from chemical attack. Carefully read the installation section of the manual. The transducer should have a tough PVC jacket. If the environmental conditions are severe, a protective sleeve may be inserted over the cable, electrical checks are recommended.

If malfunction of the transducer is suspected, the following electrical checks are recommended:

1. Input resistance (RED to BLACK) should be  $150 \pm 50$  ohms, ohms.
2. Output resistance (GREEN to WHITE) should be  $115 \pm 25$  ohms.
3. Resistance to ground between any lead and transducer housing should be  $100 \pm 10$  ohms. When making this measurement make sure that the common insulation tester between two leads. The transducer will be permanently damaged.

**CAUTION:** 6 volts is the maximum voltage which can be safely applied to the transducer input or output terminals. If 6 volts is applied from the green to either the red or black terminals the unit may be permanently damaged. If the transducer has been accidentally overloaded, a permanent zero shift may occur. The transducer may still function properly however and a re-balancing with an external resistance should be performed to verify the proper functioning of the unit.

## Instrumentation and Operation Theory

The instrumentation for use with the PX102 transducers is very simple. Only a regulated constant voltage source and a meter recorder, oscilloscope or other readout instrument is required. The PX102 transducer may be excited with either ac or dc voltage. For many temporary or test applications, a battery may be a suitable source. The recommended excitation is 5 Vdc or ac rms. Do not exceed 6 V. The supply should be able to deliver at least 50 mA at 5 V. Connect the excitation across the red and black leads. The red and white leads should be connected to the readout instrument.

OMEGA ENGINEERING, INC. offers a wide range of signal conditioners, controllers and meter indicators for both bench and panel mount; and a calculator for the Model PX102. These units supply the 5 volt excitation and signal amplification. Refer to catalog for details.

## Application Information

The PX102 is particularly well suited for making measurements where shock and vibration are present. Because of low operating stresses, they may be used up to rated pressure range without any reduction in life expectancy.

All transducers measure gauge pressure. On ranges of 100 psig and above, the diaphragm pressure is not compensated for any zero normal parameter, therefore, the unit will provide negligible effect on accuracy. These units have been sealed to provide maximum reliability in the presence of moisture and corrosive atmospheres.

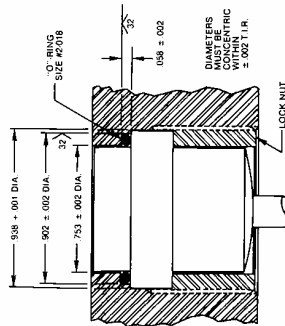
The 50 psig and lower range units have the internal cavity of the transducer vented to atmosphere. This is accomplished by a vent hole in the diaphragm. The vent hole is sealed with a cable jacket. It is important that the cable jacket be properly installed. The cable jacket should not be punctured, particularly in corrosive environments, and should be terminated in a clean, dry environment.

PX102 pressure transducers may also be supplied for measuring absolute pressure. The diaphragm pressure is not compensated for any zero normal parameter, therefore, the unit will provide negligible effect on accuracy. These units have been sealed to provide maximum reliability in the presence of moisture and corrosive atmospheres.

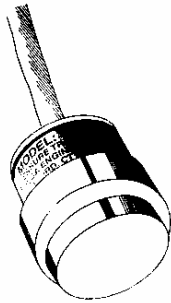
## Installation

The PX102 transducer may be easily mounted in the wall of a pressure vessel, pump housing, machine, etc. or it may be provided with an adapter to standard piping or tubing systems. Adapters for many different types of plumbing connections are available.

The suggested mounting method shown below may be used for all pressure ranges. When using the suggested pressure mounting, care must be exercised not to damage the "O" ring



Suggested Mounting for All Pressure Ranges



**PX102 Series**  
Pressure Transducers  
Operator's Manual: 0M209/0695

**ZERO BALANCE SENSITIVITY**  
Within  $\pm 5$  mV at 70°F (21.1°C)  
20 mV/V

**EXCITATION VOLTAGE**  
5 Vdc or ac rms recommended; 6 V maximum

**BRIDGE RESISTANCE**  
Input, 150 ohms  $\pm 50$  ohms  
Output, 115 ohms  $\pm 25$  ohms  
**ELECTRICAL CONNECTION**  
4-wire shielded cable, 3 feet (0.91m) long.

## PERFORMANCE

**ACCURACY**  
100 to 5000 PSIG  $\pm 0.25\%$  FS SL  
All other ranges  $\pm 1\%$  FS SL

**RESOLUTION**  
Infinite  
**OPERATING TEMPERATURE RANGE**  
 $-65^{\circ}$  to  $200^{\circ}$ F ( $-53.9^{\circ}$  to  $68.3^{\circ}$ C)

**COMPENSATED TEMPERATURE RANGE**  
100 to 5000 PSIG  $\pm 30^{\circ}$ F to  $130^{\circ}$ F  
All other ranges  $\pm 30^{\circ}$ F to  $130^{\circ}$ F

**THERMAL EFFECT ON ZERO**  
100 to 5000 PSIG = Less than  $\pm 1\%$  range within compensated range.  
All other ranges = Less than  $\pm 5\%$  within compensated range

**THERMAL EFFECT ON SPAN**  
100 to 5000 PSIG = Less than  $\pm 1\%$  range within compensated range.  
All other ranges = Less than  $\pm 2\%$  within compensated range

## PHYSICAL

**TYPE**  
PSIG Units 100 PSI and above have cases sealed from the surrounding atmosphere, providing corrosion environment (oil). Ranges below 100 PSI are vented to the atmosphere and read gauge pressure independent of atmospheric pressure changes (e.g., sea level).

**RANGES**  
0.5, 15, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10,000, 15,000, 20,000, 30,000, 50,000, 100,000  
**OVERLOAD**  
2 times rated pressure without damage, 5 times rated pressure without bursting

**CASE MATERIAL**  
316L stainless steel for ranges 50 PSI and under  
PSI and over  
304 stainless steel for ranges 100 PSI and over  
Up to 60 G's. Meets MIL-STD-883B.

**SHOCK & VIBRATION RESISTANCE**  
100 millivolts at rated pressure,  $\pm 1\%$  gain circuit

## General

The PX102 pressure transducer is a rugged, accurate and small pressure measuring instrument designed for industrial service. Its construction is rugged and reliable. The transducer is made of stainless steel. Some factor strain gages mounted on a unique sensor measure the deflection of the diaphragm at its center. The strain gages are wired into a Wheatstone Bridge which is balanced at no-load conditions. Pressure on the diaphragm causes it to deflect, straining the gages, and changing their electrical resistance. When an excitation voltage is applied, the strain gages produce a signal voltage proportional to pressure produced across the other two corners. The high sensitivity of the strain gage-sensor combination allows the diaphragm deflection to be as low as 0.002 inches. Thus, the diaphragm stresses are minimized insuring long life.



OMEGA<sup>SM</sup> On-Line Service  
<http://www.omega.com>  
 Internet e-mail  
[info@omega.com](mailto:info@omega.com)

**Servicing North America:**  
 One Omega Drive, P.O. Box 417  
 Stamford, CT 06407-0417  
 Tel: (203) 359-1600  
 FAX: (203) 359-7700

**Servicing Europe:**  
 Breda, The Netherlands  
 Postbus 8034, 1180 LS Amstelveen  
 Tel: (31) 20 1848405  
 Toll Free in Benelux: 06 094344  
 FAX: (31) 20 643643

**Czech Republic:**  
 Omega-S, 762 733 01 Karcova  
 Tel: 42 (09) 6311890  
 FAX: 42 (09) 6311114

**France:**  
 9, rue Denis Papin, 79400 Trappes  
 Tel: 33 (1) 30 62 14 00  
 Toll Free in France: 05-4-OMEGA  
 FAX: 33 (1) 30 99 91 20

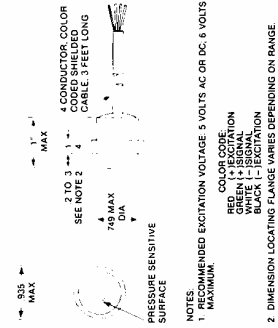
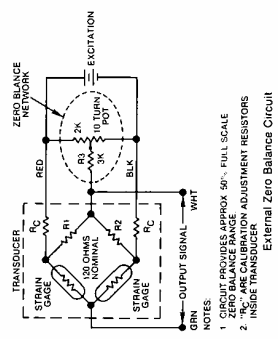
**Germany/Austria:**  
 Daimlerstrasse, 26, D-75362 Deckelbrunn,  
 Germany, Tel: 49 (0)760 3077  
 Toll Free in Germany: 0180 11 21 49  
 FAX: 49 (0)760 8540

**United Kingdom:**  
 25 Southampton Road, Broomfield, Solihull,  
 Leicestershire, LE16 7LU, England  
**ISO 9002 Certified**  
 Tel: 44 (1453) 245520  
 Toll Free in England: 0800 484 484  
 FAX: 44 (1453) 283912

**USA:**  
 ISO 9001 Certified  
**Canada:**  
 976 Bregat  
 Laval (Quebec) H7L 5A1  
 Tel: (514) 856-6928  
 FAX: (514) 856-6886

**For immediate technical or application assistance:**  
 USA and Canada  
 Sales Service: 1-800-541-3131 / 1-800-TC-OMEGA  
 Customer Support: 1-800-527-5275 / 1-800-5A-WHETHER  
 Engineering Service: 1-800-527-5275 / 1-800-5A-WHETHER  
 TELEF. 486404 EASYLINK 62686974 CABLE OMEGA

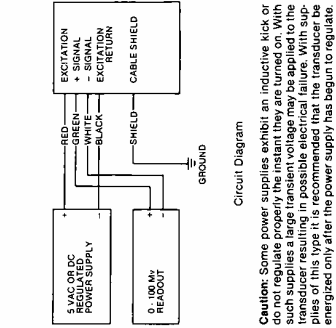
**Mexico:**  
 Tel: (05) 800-TC-OMEGA FAX: (05) 203-359-7807



Circuitry used with the transducer can cause adverse changes in its temperature compensation. This problem can be avoided with a PX102 transducer by shunting only across the inactive resistors on the "white side" of the bridge. If for any reason the shunt is not available, the bridge resistors should be kept as large as possible (20K to minimum) and an equal shunt on the other active gage will nullify the effect on temperature compensation. Shunting the active gages will reduce the output signal somewhat; ZOK II shunts will reduce the sensitivity by about 0.6%.

A wide variety of readily available meters make suitable readout for the PX102 transducers. When equipped with about 5.6 V, the PX102 will output 100 mV full scale. Use with most digital panel meters.

Shunt calibration is a technique used with strain gage transducers to simulate the effect of applied pressure to produce an output signal. Shunting 1400 ohms across the black and white leads of the PX102 transducer produces a signal approximately equal to that produced by a 3000 Ohm shunt will simulate a 50% output signal. This shunt is approximate and will vary from unit to unit. If shunt calibration is to be used, it is recommended that the actual transducer shunt output be determined by test and recorded.



**Caution:** Some power supplies exhibit an inductive kick or surge which may damage the transducer. Such supplies should be regulated or a diode should be placed in parallel with the transducer to protect it from inductive kick or surge. The maximum calibration error introduced by series input dropping resistors is +6% per 100 $\Omega$  and occurs when the resistance becomes infinite. (Constant current supply.)

The signal voltage appearing across the output leads of the transducer is both a function of the applied pressure and the excitation voltage. The transducers have been calibrated to 100 mV  $\pm$  1% full scale output with exactly 5.0 volts excitation. If, for example, 2.5 volts excitation is used, the output will be 50 mV. The signal voltage appearing across the output leads of the transducer will be present. This voltage (within 5% of the transducer's full scale output) can easily be nulled out by most readout instruments. Nulling can also be achieved by placing a shunt resistor from the white lead to ground or black depending upon the polarity of the imbalance.

**Pressure Overloads**  
 The PX102 transducers will withstand high overloads. See Overload Specification on page 1.

Overload conditions may occur if electrical failure may occur. As a safety feature, the transducer is designed to withstand much higher burst pressures than the pressure which will cause permanent damage.

**Important:** Both static and dynamic overloads must be considered when selecting a pressure transducer. In most systems, pressure fluctuations exist. These fluctuations can have very large and very fast peak pressures as in water hammer. The transducer must be able to withstand these high pressure pulses are expected, the transducer rating should be high enough to prevent overload by the pressure pulses. The PX102 transducer will be reduced if the transducer is exposed to pressure pulses outside the range, particularly under dynamic conditions. An oscillator scope is a convenient tool for determining if high pressure transients exist in a system.

**WARRANTY/ DISCLAIMER**  
 OMEGA warrants that the transducer will be free from defects in materials and workmanship for a period of 13 months from date of purchase. OMEGA does not warrant the accuracy of the output signal of the transducer. OMEGA warrants that the transducer will be free from defects in materials and workmanship for a period of 13 months from date of purchase. OMEGA does not warrant the accuracy of the output signal of the transducer. OMEGA warrants that the transducer will be free from defects in materials and workmanship for a period of 13 months from date of purchase. OMEGA does not warrant the accuracy of the output signal of the transducer.

**RETURN REQUESTS/INQUIRIES**  
 Direct all return requests to OMEGA Engineering, Inc., 25 Southampton Road, Broomfield, Solihull, Leicestershire, LE16 7LU, England. OMEGA Engineering, Inc. is a registered trademark of OMEGA Engineering, Inc. All rights reserved. OMEGA is a registered trademark of OMEGA Engineering, Inc. All rights reserved.

**FOR NON-WARRANTY REPAIR OR CALIBRATION:**  
 Have the following information available:  
 1. Model and serial number of the product.  
 2. Repair instructions and/or specific problems relative to the product.  
 3. Repair instructions and/or specific problems relative to the product.

# Annexe E

# Fiche technique de la pompe de chantier



**KVM 42**

**Truck-mounted concrete pump with 4-section placing boom**



## The most successful long boom in North America

Here is the concrete pump that has made the difference in North America to your feet. Use the 42-meter 4-section boom on flat, uneven terrain. The boom's single setup reaches 125-feet. The boom's 4 sections fold up with the second joint of the boom. The boom's maneuverability of the twin boom sections allows you to get on jobs because of boom length. Add the best proven controls for pump owners. Choose from the 42-meter boom's 4-section boom provides consistent pumping performance aided by reliable, all-terrain tires. The boom's 4-section boom is made of heavy-duty Schwing Rock Valve. It only do your receive world-class performance. The boom's 4-section boom is also the best choice for your concrete pump. Look no further. Schwing engineers your success. The boom's 4-section boom is made of heavy-duty technology. It can extend 125 feet and higher profits.

**Four-section overhead Roll & Fold design allows maximum boom utilization**

**Common elbows on boom simplify spare parts stocking**

**Proven large diameter rotary bearing for smooth rotation**

**Electronically driven Hydraulic oil cooler**

**Gradual taper from 7" outlet to 3" boom pipe assures smooth concrete flow**

**Rock Valve offers lowest cost per yard operation**

**Pipeline brackets are welded on both sides of boom for secure attachment**

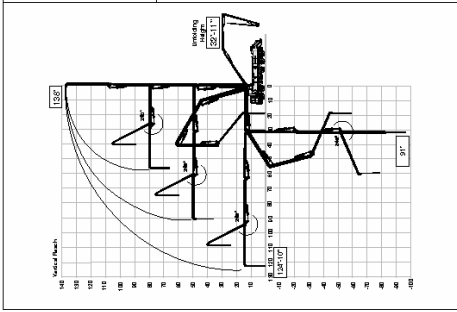
**Manual boom controls near turret for easy access once boom is unfolded**

**Water system features external pump, large volume tank and outlet near hopper**

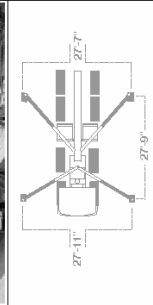
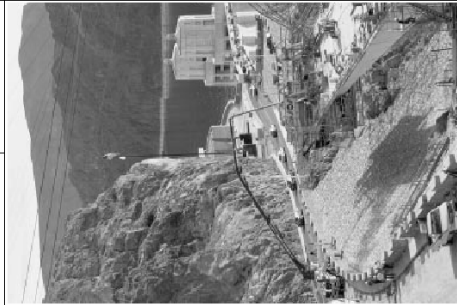
**Controls for outriggers on both sides of the machine for operator convenience**

**Hydraulically driven hopper vibrator assures continuous smooth flow of concrete to the pumping cylinders**

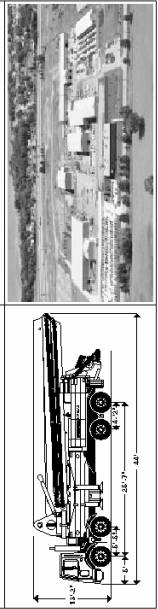
**Four-section boom versatility and operator convenience**



Use the proven four section roll over design to get in, out, down, over and under. The possibilities are endless and the results impressive. No need for a lift truck, no need for a rig, no need for a crane, no need for a derrick, no need for a subframe. Stability in all boom positions in the road when at maximum output.



Pump Kits on K114 42	2023-4	2023-5	2023H-6	Boom Specifications	
				U.S.	Metric
Max. Concrete Output (cu/yd/hr)	170	209	102	130'	42.0 m
Max. Pressure on Concrete (PSI)	5007	1097	1273	115'	35.3 m
Max. Concrete Discharge (ft)	9	9	9	100'	30.5 m
Max. Concrete Discharge (m)	3	3	3	30.5'	9.3 m
Max. Concrete Spread Length (ft)	79	79	79	24.1'	7.35 m
Max. Concrete Spread Length (m)	2.4	2.4	2.4	7.35'	2.24 m
Max. Spread Rate (cu/yd/hr)	2.5	2.5	2.5	30.4'	9.26 m
Max. Spread Rate (m <sup>3</sup> /hr)	0.075	0.075	0.075	9.26'	2.82 m
Specifications are subject to change without prior notice.					



**SCHWING AMERICA INC.**  
 5600 Centerville Road  
 St. Paul, MN 55127  
 Tel: 651-428-0999  
 Fax: 651-429-0464  
 www.schwing.com

Printed on recycled paper

699-73M

# Annexe F Formulations et propriétés des mélanges de béton pour la campagne de pompage en laboratoire

Nom*	E/L	Liant (kg)	eau (kg)	pierre (kg)	type pierre	sable (kg)	air (%)	pâte (%)	Aff. (mm)	G (N/m)	H (N/m)	Gic (N/m)	Hic (N/m)
LT-1-500	0,4	514	207	803	L01-308	805	2,5	37,4	220	1,8	6,3	3,2	7
ST-1-500	0,4	500	200	813	L01-308	804	2,4	37,2	205	3,2	4,7	8	7,3
SF-1-500	0,42	502	211	799	L01-308	795	2,5	38	220	2,2	5,6	4,8	7,2
T10-1-500	0,42	514	214	799	L01-308	796	2,7	37,8	240	1,8	5,2	3,4	6,2
ST-2-450	0,4	449	179	867	L01-311	867	2,4	33,4	200	4,3	5,3	5,2	7,8
ST-2h-330	0,65	327	212	891	L01-311	891	1,5	32,5	210	1,6	4,2	2,7	3,2
LT-2-450	0,4	450	179	868	L01-311	868	3,1	32,6	210	3,2	7	6,6	9
LT-2h-330	0,65	331	215	886	L01-311	886	2,1	32,3	230	0,1	4,2	1,3	3,7
ST-3-440	0,4	432	172	873	L01-308	880	2,6	32	210	2,6	8,8	4,2	10,5
LT-3-440	0,4	442	176	868	L01-308	877	3	31,8	200	3,6	7,8	4,6	9,2
SF-3-440	0,4	431	172	862	L01-308	868	3,7	31,7	50	9,6	3,7	8,8	7,9
T10-3-440	0,4	449	180	858	L01-308	859	3,5	32,3	80	7,2	6,4	6,8	9,4
T10-4-410	0,39	414	163	884	L01-308	893	4,2	29,5	220	3,3	11,6	2,7	12,6
ST-4-410	0,4	405	162	898	L01-308	905	2,6	30,1	180	4,9	13,2	4,2	13,7
LT-4-410	0,4	413	165	894	L01-308	901	3	30	160	3,4	11	3,4	12,6
SF-5-500	0,44	503	220	798	L01-301	773	2,5	41,3	150	2,6	4,2	4,8	5,2
LT-5-465	0,42	465	195	844	L01-301	841	2,5	37	160	3	5,4	6,2	4,6
LT-5-580	0,43	581	248	746	L01-301	737	1	44,6	240	0,6	2,6	2,4	2
SF01A	0,3	643	190	681	L01-301	680	8,5	49,1	100	4,9	2,5	ND	ND
SF02A	0,35	600	207	689	L01-301	691	7,5	48,3	ND	5,8	2,9	ND	ND
SF03A	0,41	400	164	787	L01-301	780	11,5	41,3	60	7,4	2	ND	ND

\*Légende des noms (type de liant) :

LT - Lafarge ternaire

ST - St-Laurent ternaire

SF - Lafarge avec fumée silice

T10 - Lafarge type 10



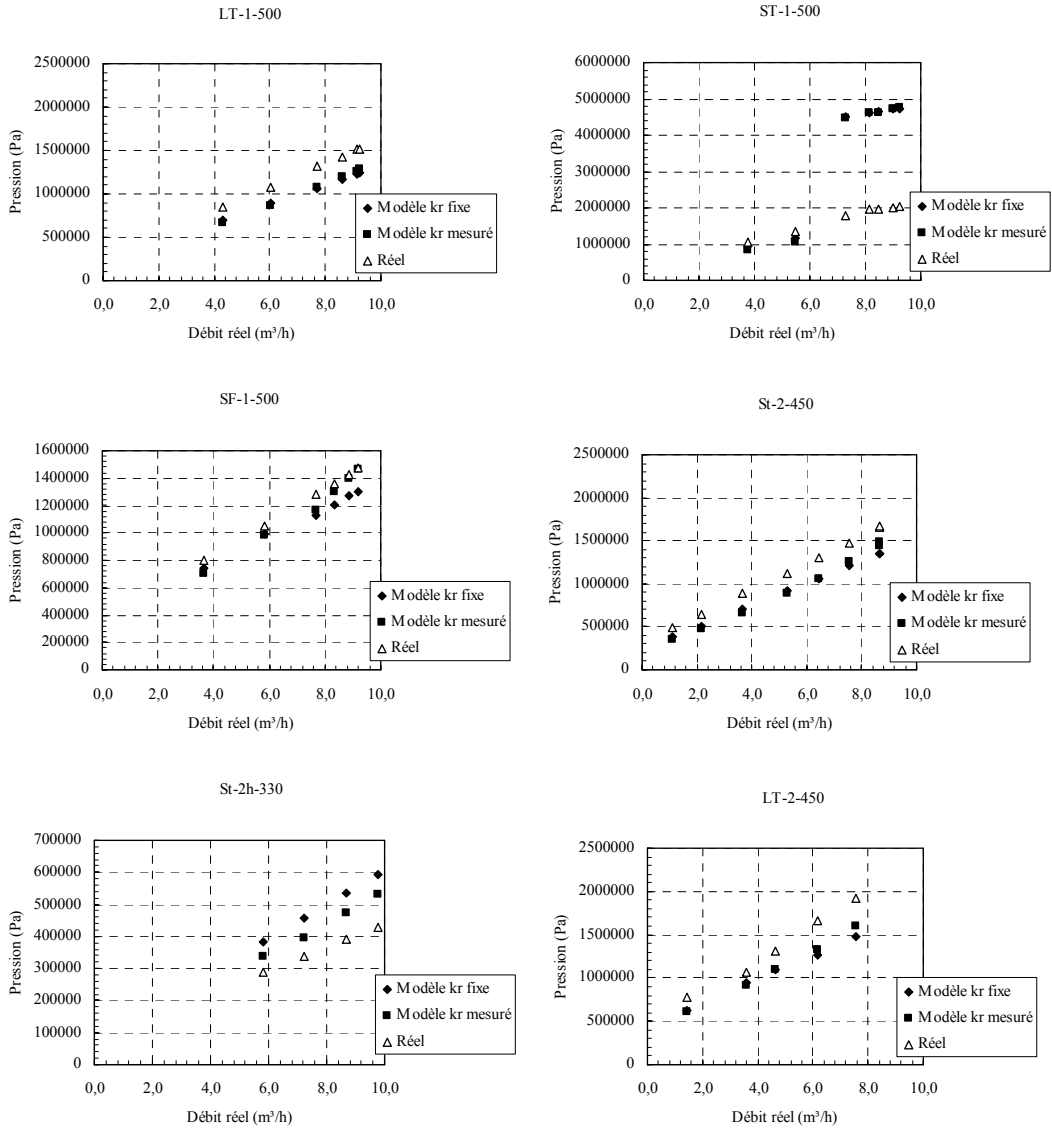
## Annexe G Propriétés rhéologiques, tribologiques et de pompages des mélanges de la campagne de laboratoire

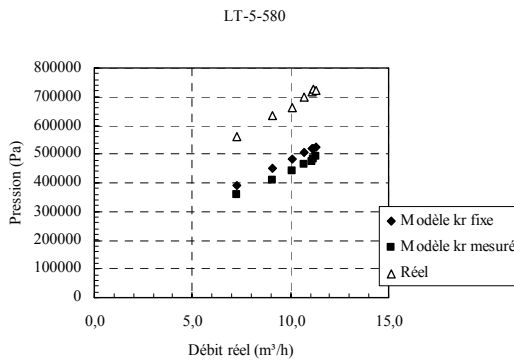
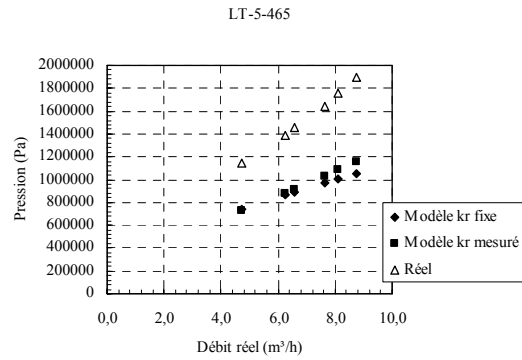
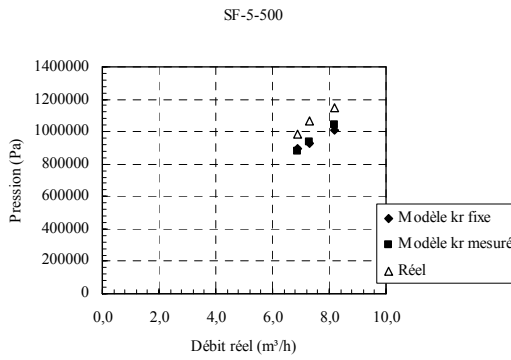
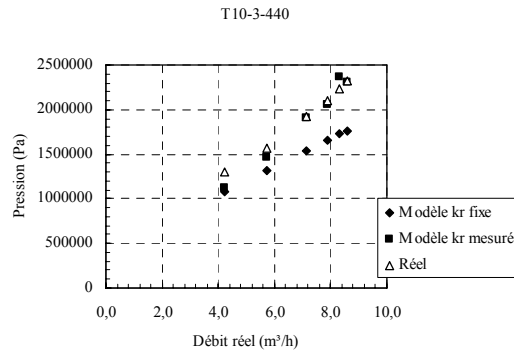
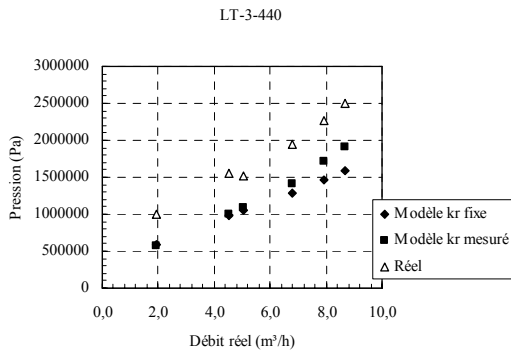
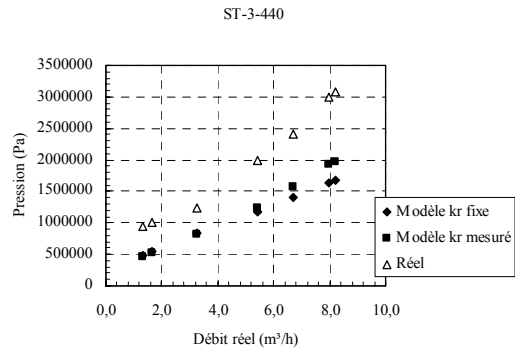
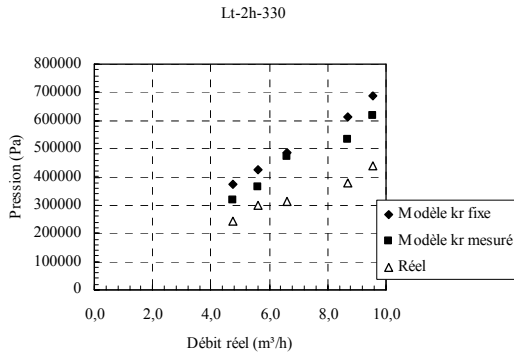
Nom mélange	Prop rhéologiques		Prop rhéologiques fondamentales		Tribomètre		Tribomètre unités fondamentales		Propriétés de pompage	
	G Nm	H Nms	$\tau$ Pa	$\mu$ Pas	$G_{ic}$ Nm	$H_{ic}$ Nms	$\tau_{0i}$ Pa	$\eta_i$ Pas/m	$\tau_{0p}$ Pa	$\eta_p$ Pas/m
LT-1-500	1,8	6,3	783,8	20,6	3,2	7	163,4	539,3	405,1	393,88
ST-1-500	3,2	4,7	1001,3	-0,6	8	7,3	408,6	562,4	619,73	522,45
SF-1-500	2,2	5,6	846,0	11,3	4,8	7,2	245,1	554,7	480,6	311,35
ST-2-450	4,3	5,3	1172,1	7,4	5,2	7,8	265,6	600,9	382,57	477,82
ST-2h-330	1,6	4,2	752,8	-7,2	2,7	3,2	137,9	246,5	129,07	115,32
LT-2-450	3,2	7	1001,3	29,8	6,6	9	337,1	693,4	500,92	616,82
LT-2h-330	0,1	4,2	519,8	-7,2	1,3	3,7	66,4	285,1	107,45	130,49
ST-3-440	2,6	8,8	908,1	53,6	4,2	10,5	214,5	808,9	549,4	895,3
LT-3-440	3,6	7,8	1063,4	40,4	4,6	9,2	234,9	708,8	668,11	757,17
T10-3-440	7,2	6,4	1622,5	21,9	6,8	9,4	347,3	724,2	714,38	416,84
SF-5-500	2,6	4,2	908,1	-7,2	4,8	5,2	245,1	400,6	460,43	249,05
LT-5-465	3	5,4	970,2	8,7	6,2	4,6	316,6	354,4	545,69	440,79
LT-5-580	0,6	2,6	597,5	-28,3	2,4	2	122,6	154,1	301,44	124,45

# Annexe H Mesures des pressions et vitesses pour la campagne de laboratoire

	No débit	Psi (Psi)	Teff (s)	Tmoy (s)	Veff (m/s)	Vmoy (m/s)	Teff/(t-moy-Trv) (t)	Pression (Pa)	Friction boyau (Pa)
LT-1-500	1	122,86	4,27	5,44	0,78	0,61	0,86	846815,66	694,57
	2	155,84	2,79	3,83	1,17	0,85	0,84	1074148,29	881,03
	3	190,16	1,90	2,90	1,66	1,09	0,79	1310711,92	1075,06
	4	206,47	1,60	2,55	1,94	1,22	0,78	1423136,79	1167,27
	5	219,32	1,44	2,35	2,11	1,29	0,78	1511685,26	1239,90
	6	220,18	1,40	2,32	2,17	1,31	0,77	1517660,02	1244,80
ST-1-500	1	196,31	3,31	4,05	0,95	0,77	0,93	1353103,07	1109,83
	2	256,12	2,02	2,92	1,49	1,03	0,84	1765330,73	1447,94
	3	284,82	1,61	2,48	1,85	1,20	0,81	1963207,23	1610,24
	4	290,84	1,44	2,31	2,04	1,27	0,79	2004653,53	1644,24
	5	297,76	1,37	2,24	2,14	1,31	0,78	2052378,42	1683,38
	7	154,14	6,01	6,15	0,54	0,53	1,06	1062460,97	871,44
	8	285,40	1,65	2,57	1,79	1,15	0,80	1967184,10	1613,50
	SF-1-500	1	116,11	5,14	6,43	0,65	0,52	0,87	800324,86
2		151,88	2,73	3,86	1,16	0,82	0,81	1046865,69	858,65
3		185,92	1,77	2,80	1,72	1,08	0,77	1281475,16	1051,08
4		197,69	1,45	2,49	2,03	1,18	0,73	1362641,72	1117,65
5		207,01	1,29	2,31	2,25	1,26	0,71	1426868,28	1170,33
6		214,15	1,18	2,20	2,42	1,30	0,70	1476091,40	1210,70
ST-2-450	1	93,30	9,73	11,17	0,35	0,30	0,91	643074,11	527,46
	2	128,34	5,19	6,45	0,64	0,52	0,87	884630,46	725,58
	3	162,75	3,15	4,29	1,02	0,75	0,83	1121810,29	920,12
	4	188,07	2,38	3,48	1,33	0,91	0,80	1296339,89	1063,27
	5	213,44	1,61	2,66	1,70	1,07	0,76	1471203,70	1206,70
	6	240,91	1,38	2,43	2,16	1,22	0,71	1660547,63	1362,00
	7	242,95	1,37	2,36	2,10	1,22	0,74	1674555,99	1373,49
	8	71,09	21,58	21,73	0,16	0,16	1,02	490019,32	401,92
ST-2h-330	1	41,78	3,61	4,35	0,99	0,82	0,94	287970,11	236,20
	2	49,13	2,80	3,41	1,25	1,02	0,96	336024,57	277,74
	3	56,82	2,14	2,80	1,61	1,23	0,93	391657,00	321,24
	4	62,04	1,77	2,44	1,91	1,38	0,91	427636,51	350,75
	5	65,17	1,58	2,24	2,13	1,50	0,91	449214,49	368,45
LT-2-450	1	155,44	5,09	6,49	0,65	0,51	0,85	1071418,52	878,79
	2	190,91	3,54	4,90	0,91	0,66	0,80	1315871,57	1079,29
	3	241,76	2,30	3,54	1,34	0,87	0,76	1666406,72	1366,80
	4	279,56	1,66	2,79	1,80	1,07	0,72	1926895,64	1580,46
	5	113,20	14,60	16,65	0,23	0,21	0,90	780219,18	639,94
LT-2h-330	1	43,36	3,89	4,49	0,92	0,80	0,98	298899,84	245,16
	2	35,21	5,00	5,53	0,74	0,67	0,99	242713,61	199,08
	3	45,76	2,68	3,74	1,30	0,93	0,82	315383,56	258,68
	4	55,19	2,16	2,80	1,59	1,23	0,94	380417,69	312,02
	5	64,13	1,80	2,49	1,87	1,35	0,91	442005,47	362,54
	6	66,22	1,64	2,32	2,06	1,46	0,90	456403,77	374,35
ST-3-440	1	179,06	5,25	6,99	0,61	0,46	0,81	1234173,15	1012,28
	2	287,43	2,73	4,08	1,15	0,77	0,76	1981182,50	1624,99
	3	349,86	1,89	3,22	1,61	0,95	0,70	2411471,58	1977,91
	4	436,25	1,34	2,54	2,14	1,13	0,66	3006968,93	2466,35
	5	446,03	1,29	2,45	2,20	1,16	0,66	3074352,14	2521,61
	6	146,02	11,68	14,18	0,28	0,23	0,85	1006498,86	825,54
	7	135,63	15,54	18,10	0,22	0,19	0,88	934872,13	766,79
LT-3-440	1	220,80	3,21	4,65	1,04	0,71	0,77	1521926,61	1248,30
	2	283,47	1,96	3,25	1,59	0,96	0,71	1953853,58	1602,57
	3	329,10	1,44	2,68	2,08	1,12	0,66	2268391,13	1860,56
	4	361,82	1,19	2,35	2,43	1,23	0,64	2493899,82	2045,52
	5	144,42	8,23	10,36	0,35	0,28	0,83	995428,16	816,46
	6	224,95	3,48	5,00	0,92	0,64	0,77	1505233,31	1271,75
T10-3-440	1	189,07	3,38	5,03	0,89	0,59	0,75	1303202,88	1068,90
	2	228,36	2,09	3,53	1,37	0,81	0,69	1574024,08	1291,03
	3	278,93	1,32	2,70	2,07	1,01	0,60	1922552,70	1576,90
	4	304,66	1,15	2,42	2,34	1,11	0,60	2099926,88	1722,38
	5	324,47	0,94	2,25	2,82	1,18	0,54	2236445,91	1834,36
	6	335,94	0,95	2,16	2,78	1,22	0,57	2315516,27	1899,21
Autres SF-5-500	1	142,50	2,15	3,12	1,41	0,97	0,82	982209,75	805,62
	2	154,30	1,67	2,60	1,61	1,03	0,80	1063543,61	872,33
	3	166,80	1,34	2,26	1,95	1,16	0,76	1149702,36	943,00
LT-5-465	1	165,76	3,50	4,68	0,89	0,66	0,84	1142500,36	937,09
	2	200,84	2,23	3,39	1,35	0,88	0,77	1384358,52	1135,46
	3	211,59	2,02	3,18	1,46	0,93	0,75	1458415,27	1196,21
	4	238,69	1,58	2,67	1,82	1,08	0,73	1645250,72	1349,45
	5	254,90	1,39	2,47	2,04	1,14	0,70	1756851,62	1441,07
	6	275,34	1,21	2,24	2,29	1,24	0,70	1897836,20	1556,62
LT-5-580	1	81,34	2,57	3,28	1,31	1,02	0,93	560654,91	459,85
	2	91,94	2,00	2,66	1,71	1,28	0,93	633703,76	519,77
	3	95,97	1,73	2,38	1,96	1,42	0,92	661524,73	542,59
	4	101,14	1,57	2,23	2,15	1,52	0,91	697122,78	571,79
	5	103,99	1,49	2,14	2,25	1,57	0,91	716737,62	587,88
	6	105,27	1,40	2,07	2,35	1,58	0,89	725601,95	595,15
	7	104,47	1,39	2,09	2,40	1,60	0,87	720095,35	590,63

# Annexe I Courbes pressions-débit pour la campagne de laboratoire





## Annexe J      Données recueillies pour l'analyse du réducteur

	no débit	P1	P2	delta P.
LT-1-500	1	122,1	122,9	-0,8
LT-1-500	2	155,9	155,8	0,0
LT-1-500	3	192,1	190,2	2,0
LT-1-500	4	206,4	206,5	0,0
LT-1-500	5	219,3	219,3	0,0
LT-1-500	6	220,6	220,2	0,4
ST-1-500	1	201,4	196,3	5,1
ST-1-500	2	260,3	256,1	4,2
ST-1-500	3	284,2	284,8	-0,7
ST-1-500	4	292,7	290,8	1,8
ST-1-500	5	297,7	297,8	-0,1
ST-1-500	7	163,6	154,1	9,5
ST-1-500	8	285,8	285,4	0,4
SF-1-500	1	115,6	116,1	-0,5
SF-1-500	2	150,9	151,9	-0,9
SF-1-500	3	185,1	185,9	-0,8
SF-1-500	4	197,5	197,7	-0,2
SF-1-500	5	205,4	207,0	-1,6
SF-1-500	6	212,3	214,2	-1,9
ST-2h-330	1	44,2	41,8	2,4
ST-2h-330	2	50,9	49,1	1,8
ST-2h-330	3	58,3	56,8	1,5
ST-2h-330	4	63,9	62,0	1,8
ST-2h-330	5	67,1	65,2	1,9
LT-2-450	1	156,5	155,4	1,0
LT-2-450	2	190,3	190,9	-0,6
LT-2-450	3	234,3	241,8	-7,5
LT-2-450	4	277,3	279,6	-2,2
LT-2-450	5	116,3	113,2	3,2
LT-2h-330	1	44,2	43,4	0,8
LT-2h-330	2	38,5	35,2	3,3
LT-2h-330	3	51,4	45,8	5,7
LT-2h-330	4	63,7	55,2	8,5
LT-2h-330	5	71,4	64,1	7,3
LT-2h-330	6	73,2	66,2	7,0
ST-3-440	1	180,5	179,1	1,4
ST-3-440	2	288,6	287,4	1,2
ST-3-440	3	356,2	349,9	6,3
ST-3-440	4	436,4	436,3	0,1
ST-3-440	5	448,0	446,0	2,0
ST-3-440	6	152,3	146,0	6,3
ST-3-440	7	143,1	135,6	7,4
LT-3-440	1	224,1	220,8	3,3
LT-3-440	2	278,9	283,5	-4,5
LT-3-440	3	327,0	329,1	-2,1
LT-3-440	4	360,9	361,8	-0,9
LT-3-440	5	147,9	144,4	3,5
LT-3-440	6	228,0	225,0	3,0
LT-5-465	1	163,9	165,8	-1,8
LT-5-465	2	202,4	200,8	1,6
LT-5-465	3	212,5	211,6	1,0
LT-5-465	4	241,2	238,7	2,5
LT-5-465	5	259,0	254,9	4,1
LT-5-465	6	280,8	275,3	5,5
LT-5-580	1	84,3	81,3	2,9
LT-5-580	3	99,1	96,0	3,1
LT-5-580	4	104,4	101,1	3,3
LT-5-580	5	107,1	104,0	3,1
LT-5-580	6	108,8	105,3	3,6

moyenne : 1,82258402

## Annexe K      Données recueillies pour l'analyse des coudes

Chantier	no débit	Pression amont (kPa)	Pression aval (kPa)	$\Delta$ pression (kPa)
1	1	448	448	0
	2	517	517	0
	3	882	875	7
2	1	345	345	0
	2	462	448	14
	3	538	524	14
7	1	352	276	76
	2	365	262	103
	3	420	352	69
	4	303	221	83
8	2	841	689	152
	3	1103	958	145
12	1	338	324	14
	2	365	289	76
13	1	1565	1461	103
	3	1096	1041	55
14	1	345	324	21
15	1	1179	1075	103
	2	1075	944	131
17	1	1640	1454	186
18	1	655	579	76
	2	503	379	124
19	1	1399	1268	131
	2	1330	1227	103
Moyennes :		752,7	678,4	74,4

## Annexe L      Données recueillies pour l'analyse d'une section droite d'acier en tenant compte de l'effet de la hauteur

No chantier	no debit	$\Delta h_{\max}$ (m)	$V_{\text{eff}}$ (m/s)	Pression prédite (kPa)	$\Delta P$ mesuré (kPa)	$\rho g h_{\max}$ (kPa)	$\Delta P + \rho g h$ (kPa)
1	1	10,3	0,9	355,5	172,3	240,5	412,8
1	2	10,3	1,3	458,5	199,9	240,5	440,4
1	3	10,3	2,6	818,3	248,1	240,5	488,7
2	1	10,3	0,6	291,0	158,5	242,4	401,0
2	2	10,3	1,5	491,9	234,4	242,4	476,8
2	3	10,3	2,1	633,6	282,6	242,4	525,0
4	1	5,2	2,4	885,3	151,6	120,2	271,9
4	2	5,2	2,2	818,7	165,4	120,2	285,7
7	1	10,1	1,9	445,7	330,8	217,0	547,8
7	2	10,1	2,2	502,6	296,4	217,0	513,4
7	3	10,1	2,5	561,3	392,9	217,0	609,9
7	4	10,1	1,9	453,3	317,1	217,0	534,1
8	1	7,3	1,4	480,6	241,2	165,1	406,3
8	2	7,3	2,3	710,5	206,8	165,1	371,9
8	3	7,3	2,3	723,0	351,5	165,1	516,6
12	1	7,3	2,2	397,9	199,9	164,7	364,6
12	2	7,3	2,5	444,5	261,9	164,7	426,6
13	1	0,0	2,0	798,6	89,6	0,0	89,6
13	3	0,0	2,0	778,6	110,3	0,0	110,3
14	1	10,1	1,6	324,5	193,0	230,2	423,2
15	1	1,8	2,0	751,2	158,5	41,1	199,6
15	2	1,8	1,8	690,5	186,1	40,9	227,0

## Annexe M    Données recueillies pour l'analyse de l'effet de la hauteur

Résultats des pressions statiques lors de l'arrêt des opérations de pompage

No chantier	Capt 1 (psi)	Capt 1 (kPa)	H max (m)	H sortie (m)	$\rho * g * h$ max (kPa)	$\rho * g * h$ min (kPa)
1	80,62	555,69	18,98	1,68	443,14	39,22
2	68,38	471,31	19,98	1,68	466,49	39,22
4	38,69	266,69	14,39	3,31	335,97	77,28
5	20,62	142,10	14,37	1,69	335,51	39,46
7	43,32	298,58	15,44	0,14	360,49	3,27
8	40,76	280,92	18,44	5,23	430,53	122,11
12	24,35	167,86	13,82	-4,04	322,67	-94,33
13	16,28	112,19	0,00	-3,90	0,00	-91,06
14	51,72	356,50	18,83	1,11	439,64	25,92
15	38,16	263,05	4,20	-9,01	98,06	-210,36
17	42,02	289,60	17,01	8,32	397,15	194,25
18	43,59	300,44	15,62	1,33	364,69	31,05
19	59,73	411,72	1,70	-6,98	39,69	-162,97

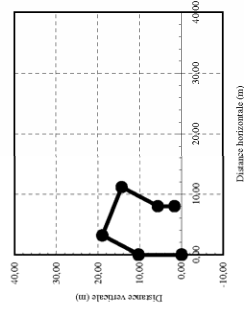


# Annexe N      Données recueillies et calculs pour la prédiction de la pression pour la flèche complète du camion-pompe

Chantier	Débit	Pression capt. 1 (Psi)	$\Delta h$ (air) (m)	$T_{eff}$ (s)	$V_{eff}$ (m/s)	$Q_{eff}$ (m <sup>3</sup> /h) *10 <sup>-2</sup>	Densité $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\tau_{oia}$ Pa	$\eta_{ia}$ Pas/m	Press prédite (coudes exclus) (kPa)	Press. Prédite (coudes incl) (kPa)	$\rho^*g^*h$ (kPa)	$PI-\rho^*g^*h$ (kPa)
1	1	186	1,7	7,1	0,9	1,06	2380,5	408,6	816,6	811,3	910,9	39,2	1242,8
	2	220	1,7	4,9	1,3	1,54	2380,5	408,6	816,6	1046,3	1174,7	39,2	1477,2
	3	310	1,7	2,5	2,6	3,23	2380,5	408,6	816,6	1867,4	2096,5	39,2	2097,5
2	1	136	1,7	10,4	0,6	7,45	2399,4	469,8	724,2	664,0	745,5	39,5	897,9
	2	181	1,7	4,4	1,5	1,81	2399,4	469,8	724,2	1122,5	1260,3	39,5	1208,0
	3	215	1,7	2,6	2,1	2,56	2399,4	469,8	724,2	1445,9	1623,3	39,5	1442,4
4	1	264	3,3	2,3	2,4	2,97	2380,1	750,7	832,0	2020,3	2268,2	77,3	1742,4
	2	200	3,3	2,5	2,2	2,67	2380,1	750,7	832,0	1868,4	2097,6	77,3	1301,3
5	1	95	1,7	3,2	1,9	2,30	2328,8	163,4	547,0	866,7	973,0	38,6	616,2
	2	136	1,7	2,2	2,8	3,44	2328,8	163,4	547,0	1240,4	1392,6	38,6	898,8
	3	156	1,7	2,3	2,6	3,24	2328,8	163,4	547,0	1174,4	1318,5	38,6	1036,7
7	1	135	0,1	3,3	1,9	2,28	2181,5	331,9	570,1	1017,0	1141,8	3,0	927,5
	2	131	0,1	3,0	2,2	2,67	2181,5	331,9	570,1	1147,0	1287,7	3,0	899,9
	3	150	0,1	2,6	2,5	3,06	2181,5	331,9	570,1	1281,0	1438,2	3,0	1030,9
	4	120	0,1	3,4	1,9	2,34	2181,5	331,9	570,1	1034,5	1161,5	3,0	824,1
8	1	163	5,2	3,4	1,4	1,73	2311,5	326,8	832,0	1096,7	1231,2	118,6	1004,9
	2	204	5,2	2,5	2,3	2,79	2311,5	326,8	832,0	1621,3	1820,2	118,6	1287,5
	3	277	5,2	2,1	2,3	2,85	2311,5	326,8	832,0	1649,9	1852,3	118,6	1790,7
12	1	115	-4,0	2,8	2,2	2,71	2305,8	188,4	477,7	907,9	1019,3	-91,4	884,0
	2	129	-4,0	2,4	2,5	3,08	2305,8	188,4	477,7	1014,3	1138,7	-91,4	980,5
13	1	299	-3,9	2,6	2,0	2,50	2329,8	372,8	1040,1	1822,5	2046,1	-89,1	2150,1
	3	219	-3,9	2,2	2,0	2,43	2329,8	372,8	1040,1	1776,9	1994,9	-89,1	1598,6
14	1	105	1,1	3,8	1,6	1,98	2314,0	143,0	539,3	740,5	831,4	25,2	698,5
15	1	256	-9,0	2,5	2,0	2,44	2328,3	464,7	947,6	1714,3	1924,6	-205,8	1970,3
	2	248	-9,0	2,9	1,8	2,19	2328,3	464,7	947,6	1575,7	1769,0	-205,8	1915,2
17	1	337	8,3	3,1	1,9	2,36	2339,7	679,2	1147,9	2109,2	2368,0	191,0	2131,9
	2	416	8,3	3,5	1,6	1,94	2339,7	679,2	1147,9	1818,3	2041,4	191,0	2676,4
18	1	168	1,3	2,6	2,0	2,40	2228,3	224,7	585,5	998,9	1121,4	29,1	1128,9
	2	144	1,3	3,1	1,7	2,07	2228,3	224,7	585,5	884,1	992,6	29,1	963,5
19	1	274	-7,0	2,0	2,3	2,80	2281,9	372,8	832,0	1659,5	1863,2	-156,3	2044,9
	2	254	-7,0	2,1	2,1	2,54	2281,9	372,8	832,0	1531,5	1719,4	-156,3	1907,0

# Annexe O Position de la flèche pour chacun des chantiers

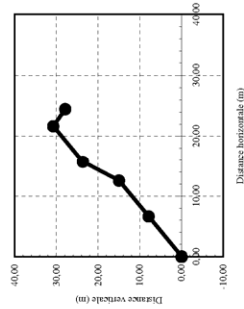
No Chantier : 1  
 Date : 2003-06-29  
 Nom :



	L (m)	angle	position	
		(deg)	x	y
Section 1	10,3	90	0,00	0,00
Section 2	9,24	70	0,00	10,30
Section 3	9,24	-30	3,16	18,98
Section 4	9,24	-110	11,16	14,36
Section 5	4	-90	8,00	5,68
			8,00	1,68

Hauteur max : 18,98  
 Hauteur sortie : 1,68

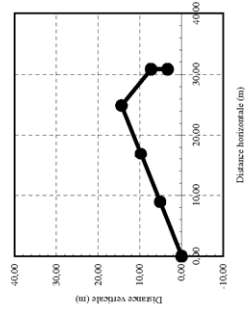
No Chantier : 3  
 Date : 2003-06-11  
 Nom :



	L (m)	angle	position	
		(deg)	x	y
Section 1	10,3	50	0,00	0,00
Section 2	9,24	50	6,62	7,89
Section 3	9,24	70	12,56	14,97
Section 4	9,24	50	15,72	23,65
Section 5	4	-45	21,66	30,73
			24,49	27,90

Hauteur max : 30,73  
 Hauteur sortie : 27,90

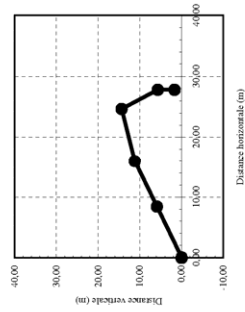
No Chantier : 4  
 Date : 2003-06-17  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	30	0,524	0,00	0,00
Section 2	9,24	30	0,524	8,92	5,15
Section 3	9,24	30	0,524	16,92	9,77
Section 4	9,24	-50	-0,873	24,92	14,39
Section 5	4	-90	-1,571	30,86	7,31

Hauteur max : 14,39  
 Hauteur sortie : 3,31

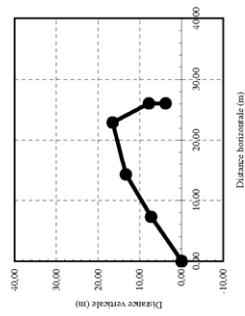
No Chantier : 5  
 Date : 2003-06-18  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	35	0,611	0,00	0,00
Section 2	9,24	35	0,611	8,44	5,91
Section 3	9,24	20	0,349	16,01	11,21
Section 4	9,24	-70	-1,222	24,69	14,37
Section 5	4	-90	-1,571	27,85	5,89

Hauteur max : 14,37  
 Hauteur sortie : 1,69

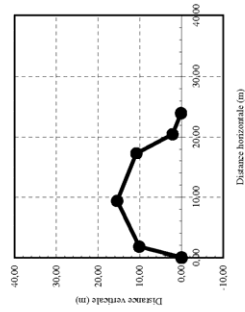
No Chantier : 6  
 Date : 2003-07-29  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	45	0,785	0,00	0,00
Section 2	9,24	41	0,716	7,28	7,28
Section 3	9,24	20	0,349	14,26	13,95
Section 4	9,24	-70	-1,222	22,94	16,51
Section 5	4	-90	-1,571	26,10	7,92

Hauteur max : 16,51  
 Hauteur sortie : 3,92

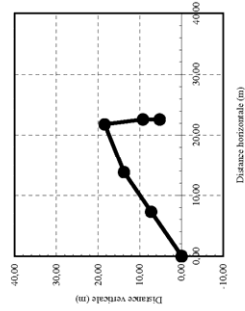
No Chantier : 7  
 Date : 2003-07-30  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	80	1,396	0,00	0,00
Section 2	9,24	35	0,611	1,79	10,14
Section 3	9,24	-30	-0,524	9,36	15,44
Section 4	9,24	-70	-1,222	17,96	10,82
Section 5	4	-30	-0,524	20,52	2,14

Hauteur max : 15,44  
 Hauteur sortie : 0,14

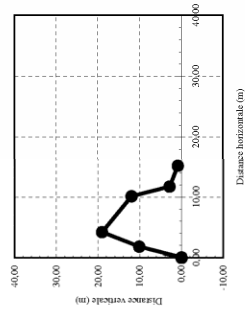
No Chantier : 8  
 Date : 2005-07-31  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	y
Section 1	10,3	45	0,785	0,00	0,00
Section 2	9,24	45	0,785	7,28	7,28
Section 3	9,24	30	0,524	13,62	13,62
Section 4	9,24	-85	-1,484	21,62	18,44
Section 5	4	-90	-1,571	22,62	9,23
				22,62	5,23

Hauteur max : 18,44  
 Hauteur sortie : 5,23

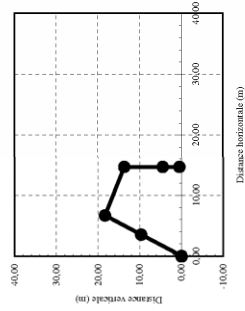
No Chantier : 9  
 Date : 2003-08-13  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	y
Section 1	10,3	80	1,396	0,00	0,00
Section 2	9,24	75	1,309	1,79	10,14
Section 3	9,24	-50	-0,873	4,18	19,07
Section 4	9,24	-80	-1,396	10,12	11,99
Section 5	4	-30	-0,524	11,72	2,39
				15,19	0,39

Hauteur max : 19,07  
 Hauteur sortie : 0,39

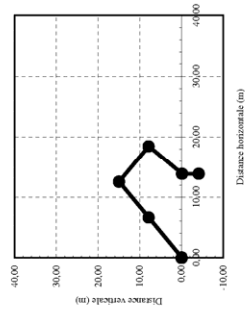
No Chantier : 10  
 Date : 2003-08-14  
 Nom :



	L (m)	angle		position	
		(deg)	(rad)	x	y
Section 1	10,3	70	1,222	0,00	0,00
Section 2	9,24	70	1,222	3,52	9,68
Section 3	9,24	-30	-0,524	6,68	18,96
Section 4	9,24	-90	-1,571	14,68	13,74
Section 5	4	-90	-1,571	14,68	4,50

Hauteur max : 18,96  
 Hauteur sortie : 0,50

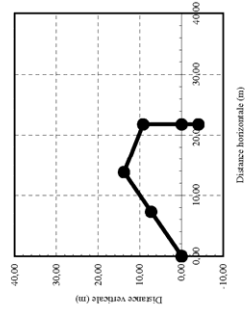
No Chantier : 11  
 Date : 2003-08-18  
 Nom :



	L (m)	angle		position	
		(deg)	(rad)	x	y
Section 1	10,3	50	0,873	0,00	0,00
Section 2	9,24	50	0,873	6,62	7,89
Section 3	9,24	-50	-0,873	12,56	14,97
Section 4	9,24	-120	-2,094	18,50	7,99
Section 5	4	-90	-1,571	13,88	-4,11

Hauteur max : 14,97  
 Hauteur sortie : -4,11

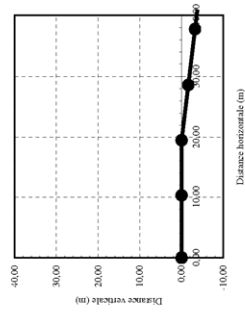
No Chantier : 12  
 Date : 2003-08-18  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	45	0,785	0,00	0,00
Section 2	9,24	45	0,785	7,28	7,28
Section 3	9,24	-30	-0,524	13,82	13,82
Section 4	9,24	-90	-1,571	21,82	9,20
Section 5	4	-90	-1,571	21,82	-0,04

Hauteur max : 13,82  
 Hauteur sortie : -4,04

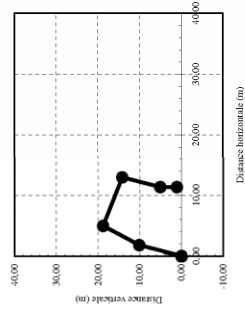
No Chantier : 13  
 Date : 2003-08-19  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	0	0,000	0,00	0,00
Section 2	9,24	0	0,000	10,30	0,00
Section 3	9,24	-10	-0,175	19,54	0,00
Section 4	9,24	-10	-0,175	28,64	-1,60
Section 5	4	-10	-0,175	37,74	-3,21

Hauteur max : 0,00  
 Hauteur sortie : -3,90

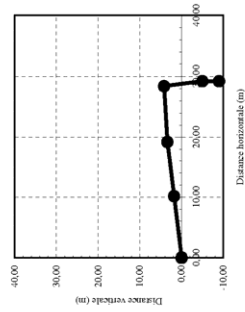
No Chantier : 14  
 Date : 2003-08-20  
 Nom :



	L (m)	angle		position	
		(deg)	(rad)	x	y
Section 1	10,3	80	1,396	0,00	0,00
Section 2	9,24	70	1,222	1,79	10,14
Section 3	9,24	-30	-0,524	4,95	18,83
Section 4	9,24	-100	-1,745	12,95	14,21
Section 5	4	-90	-1,571	11,35	5,11

Hauteur max : 18,83  
 Hauteur sortie : 1,11

No Chantier : 15  
 Date : 2003-08-22  
 Nom :

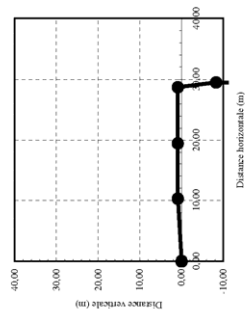


	L (m)	angle		position	
		(deg)	(rad)	x	y
Section 1	10,3	10	0,175	0,00	0,00
Section 2	9,24	10	0,175	10,14	1,79
Section 3	9,24	5	0,087	19,24	3,39
Section 4	9,24	-85	-1,484	28,45	4,20
Section 5	4	-90	-1,571	23,25	-5,01

Hauteur max : 4,20  
 Hauteur sortie : -9,01



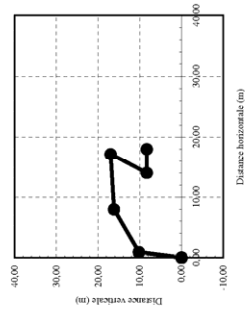
No Chantier : 16  
 Date : 2003-08-27  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	5	0,087	0,00	0,00
Section 2	9,24	0	0,000	10,26	0,90
Section 3	9,24	0	0,000	19,50	0,90
Section 4	9,24	-85	-1,484	28,74	0,90
Section 5	4	-90	-1,571	28,55	-8,31

Hauteur max : 0,90  
 Hauteur sortie : -12,31

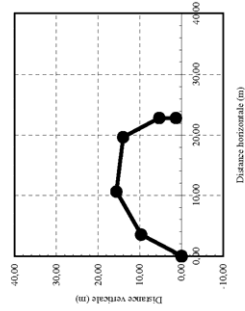
No Chantier : 17  
 Date : 2003-08-27  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	85	1,484	0,00	0,00
Section 2	9,24	40	0,696	0,90	10,26
Section 3	9,24	5	0,087	7,98	16,20
Section 4	9,24	-110	-1,920	17,18	17,01
Section 5	4	0	0,000	14,02	8,32

Hauteur max : 17,01  
 Hauteur sortie : 8,32

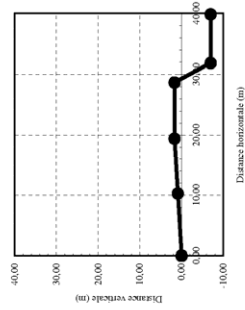
No Chantier : 18  
 Date : 2005-06-28  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	70	1,222	0,00	0,00
Section 2	9,24	40	0,698	3,52	9,68
Section 3	9,24	-10	-0,175	10,60	15,62
Section 4	9,24	-70	-1,222	19,70	14,01
Section 5	4	-90	-1,571	22,86	5,33
				22,86	1,33

Hauteur max : 15,62  
 Hauteur sortie : 1,33

No Chantier : 19  
 Date : 2003-08-29  
 Nom :



	L (m)	angle (deg)	angle (rad)	position x	position y
Section 1	10,3	5	0,087	0,00	0,00
Section 2	9,24	5	0,087	10,26	0,90
Section 3	9,24	0	0,000	19,47	1,70
Section 4	9,24	-70	-1,222	28,71	1,70
Section 5	8	0	0,000	31,87	-6,98
				33,87	-6,98

Hauteur max : 1,70  
 Hauteur sortie : -6,98