

## Système de capteurs embarqués en camion-toupie

**Auteur :** Wallon, Bertrand

**Promoteur(s) :** Courard, Luc

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/20231>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



---

## Système de capteurs embarqués en camion-toupie

---

*Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de  
master en Ingénieur Civil des Constructions*

*Auteur :*

WALLON BERTRAND

*Promoteur :*

COURARD LUC (ULIÈGE)

*Membre du Jury :*

FRANÇOIS BERTRAND (ULIÈGE)

*Co-Promoteurs :*

JOLIN MARC (ULAVAL)

BISSONNETTE BENOÎT (ULAVAL)



# Résumé

L'industrie du béton produit environ 14 milliards de mètres cubes de béton par an dans le monde. Son rôle dans la lutte contre les changements climatiques est crucial en sachant que cette industrie produit 7 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde entier. Ce travail de recherche vise à relever ce défi en développant des technologies de contrôle qualité pour le béton frais, ce qui permettra de réduire le gaspillage de béton et d'en améliorer la qualité. La propriété du béton frais étudiée ici est la maniabilité. Cette caractéristique influence la majorité des qualités de l'ouvrage. Ce paramètre est donc essentiel à surveiller lors de la livraison du béton prêt à l'emploi pour garantir les propriétés mécaniques requises à l'état durci.

L'objectif est alors de mettre en place une méthode d'estimation de l'affaissement du béton frais pour une large gamme de maniabilités à l'aide de plusieurs capteurs intégrés sur les camions toupies. Ce travail traite plus particulièrement de l'utilisation d'un capteur de pression hydraulique relié directement au moteur hydraulique du camion et de sa complémentarité avec une sonde déjà en place. Cette sonde fait partie du système embarqué de *Command Alkon* et se trouve à l'intérieur de la toupie pour mesurer certaines propriétés du béton frais, dont la maniabilité. L'utilisation de ce capteur de pression hydraulique à différentes vitesses de rotation du malaxeur (3 RPM et 14 RPM) fournit des résultats intéressants avec une bonne précision dans l'estimation de l'affaissement du béton frais. La combinaison de la sonde et du capteur de pression hydraulique permet d'accroître cette précision, ce pour une large gamme de maniabilité de béton prêt à l'emploi.

**Mots-clés :** béton frais, affaissement, capteur, capteur de pression hydraulique, camion-toupie, camion malaxeur, sonde, maniabilité, béton, chantier



# ***Abstract***

The concrete industry produces approximately 14 billion cubic meters of concrete annually worldwide. Its role in combating climate change is crucial, given that this industry accounts for 7 % of global greenhouse gas emissions. This research aims to address this challenge by developing quality control technologies for fresh concrete, which will reduce concrete waste and improve its quality. The property of fresh concrete being studied here is workability. This characteristic influences most of the qualities of the construction. Therefore, it is an essential parameter to monitor during the delivery of ready-mix concrete to ensure the required mechanical properties in the hardened state.

The objective is to establish a method for estimating the slump of fresh concrete across a wide range of workabilities using multiple sensors integrated on mixer trucks. This work specifically focuses on the use of a hydraulic pressure sensor directly connected to the truck's hydraulic motor and its complementarity with an existing probe. This probe is part of *Command Alkon's* onboard system and is located inside the mixer to measure certain properties of fresh concrete, including workability. The use of this hydraulic pressure sensor at different mixer rotation speeds (3 RPM and 14 RPM) provides interesting results with good accuracy in estimating the slump of fresh concrete. The combination of the probe and the hydraulic pressure sensor enhances this accuracy for a wide range of ready-mix concrete workabilities.

**Keywords :** fresh concrete, slump, sensor, hydraulic pressure sensor, mixer truck, probe, workability, concrete, construction site

# *Remerciements*

À travers ces remerciements, je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde gratitude envers mon promoteur, le Professeur Luc Courard de l'Université de Liège. Votre soutien, vos conseils éclairés et votre expertise m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

Un immense merci à mes deux copromoteurs de l'Université Laval, les Professeurs Marc Jolin et Benoît Bissonnette. Votre accueil chaleureux, votre collaboration sans faille et votre expertise ont grandement enrichi mon expérience canadienne et ont contribué de manière significative à la réussite de ce projet. Je souhaite remercier plus particulièrement Benoît pour sa présence et son aide précieuse pour toute la gestion administrative, sans cela ce voyage au Canada n'aurait été possible.

Je tiens également à remercier toutes les personnes de chez *Command Alkon* qui ont rendu ce travail possible grâce à leur aide et leurs conseils avisés. Votre expertise et votre disponibilité ont été des atouts majeurs dans la réalisation de ce travail.

Je souhaite également adresser mes remerciements sincères à mes collègues de bureau et à Jean-Benoît Darveau, avec qui j'ai partagé cette expérience enrichissante au Canada. Votre présence, votre camaraderie et votre collaboration ont été des éléments précieux dans la réussite de ce projet. Nos échanges réguliers, que ce soit dans le bureau ou lors de nos moments de détente au PUB, ont rendu cette expérience professionnelle particulièrement mémorable. Pour ne pas tous les citer, je tiens à remercier plus spécialement Jean-Benoît Darveau et Maxime Valverde pour leur accueil, leur disponibilité et leurs conseils pertinents tout au long de ce travail.

Je n'oublie pas de remercier mes collègues liégeois qui m'ont accompagné dans cette expérience canadienne, Elyse, Elisabeth et Julien. Un grand merci à l'ensemble de mes amis belges pour leur soutien durant toutes mes études et plus spécialement à Julien pour tous les projets réalisés ensemble durant nos études.

À ma compagne, Pauline, je suis infiniment reconnaissant pour ta compréhension, ton soutien indéfectible et ta patience pendant mon séjour au Canada. Ta présence à mes côtés, malgré les défis et la distance, m'a donné la force nécessaire pour réaliser ce projet.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien inconditionnel. Votre amour, vos encouragements et vos sacrifices ont été une source constante d'inspiration et de motivation durant ces cinq années. En écrivant ces mots, je réalise que je ne vous le dis pas assez souvent, mais je suis extrêmement reconnaissant de vous avoir dans ma vie pour m'aider à réaliser mes rêves.

À toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail au Canada, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre soutien a été inestimable et a grandement contribué à la réussite de ce projet, même à des milliers de kilomètres de distance.

*J'espère que tu es fier de moi, de là où tu es...*

# *Lexique*

- ASTM : "American Standards of Technical Material"
- BV : "Basse Vitesse de rotation de la toupie"
- CCQ : "Commission de la Construction du Québec"
- CPH : "Capteur de Pression Hydraulique"
- CSA : "Canadian Standards Association"
- E/C : "Rapport Eau/Ciment"
- GPS : "Global Positioning System"
- HV : "Haute Vitesse de rotation de la toupie"
- $\mu$  : "Viscosité plastique"
- pH : "potentiel Hydrogène"
- RPM : "Rotation Par Minute"
- $\tau_0$  : "Seuil de cisaillement"
- $\tau$  : "Contrainte de cisaillement"
- TFE : "Travail de Fin d'Études"
- UL : "Université Laval"
- ULiège : "Université de Liège"

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>6</b>
2.1	Introduction . . . . .	6
2.1.1	Rhéologie du béton . . . . .	7
2.1.2	Usine de production du béton . . . . .	8
2.1.3	Malaxage . . . . .	9
2.1.4	Transport et livraison du béton frais . . . . .	12
2.2	Maniabilité du béton dans l'industrie . . . . .	13
2.2.1	Facteurs influençant la maniabilité . . . . .	13
2.2.2	Qualité du béton frais . . . . .	15
2.2.3	Refus du béton sur chantier . . . . .	16
2.3	Mesure de la maniabilité . . . . .	18
2.3.1	Essai au cône d'Abrams . . . . .	18
2.3.2	Essais empiriques alternatifs . . . . .	21
2.3.3	Rhéomètre . . . . .	24
2.3.4	Systèmes automatisés . . . . .	26
2.3.5	Système embarqué de <i>Command Alkon</i> . . . . .	27
2.3.6	Capteur de pression hydraulique . . . . .	33
2.4	Conclusion . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>38</b>
3.1	Introduction . . . . .	38
3.1.1	Données récoltées par Nikolla D. . . . .	39

3.1.2	Données 2024 . . . . .	40
3.2	Équipements utilisés . . . . .	40
3.2.1	Types de camions . . . . .	40
3.2.2	Cône d'Abrams . . . . .	41
3.2.3	Sonde . . . . .	42
3.2.4	Capteur de pression hydraulique . . . . .	42
3.3	Phases de préparations . . . . .	44
3.3.1	Calibration du capteur à l'aide de la pompe hydraulique manuelle . .	44
3.3.2	Montage expérimental . . . . .	46
3.3.3	Traitement des données brutes . . . . .	47
3.3.4	Pression nette . . . . .	51
3.4	Conclusion . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Résultats et discussions</b>	<b>53</b>
4.1	Introduction . . . . .	53
4.2	Résultats . . . . .	53
4.2.1	Influence de la capacité du camion . . . . .	54
4.2.2	Influence du pourcentage de remplissage du camion . . . . .	56
4.2.3	Comparaison campagnes d'essais 2021 et 2024 . . . . .	58
4.2.4	Élaboration des équations de corrélations . . . . .	60
4.2.5	Estimation de l'affaissement . . . . .	62
4.2.6	Comparaison entre prédiction et affaissement au cône d'Abrams . . .	68
4.3	Conclusion . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>74</b>
	<b>Annexes</b>	<b>77</b>

# Table des figures

1.1	Bétonnières dans les années 1920 (concreteconstruction.net, 2006) . . . . .	2
2.1	Modèle de Bingham (G. Tattersall & Banfill, 1983) . . . . .	7
2.2	Influence semi-quantitative de l'accroissement de certains paramètres sur la rhéologie d'un mélange de béton frais (Ferraris 2017) . . . . .	8
2.3	Représentation de l'intérieur d'un camion malaxeur (Ambrosetti, 2015) . . . .	10
2.4	(a) Comportement du béton dans la toupie : (b) Zones actives et statiques durant les comportements "roulement" et "cascade" (Sherritt et Al., 2003 et Félix, 2002) . . . . .	11
2.5	Force de répulsion entre deux surfaces de copolymères en fonction de la distance de séparation (Flatt et al., 2004) . . . . .	15
2.6	Exemple de système de traitement des eaux (Eau Seine Normandie, 2007) . . .	17
2.7	Dimensions du cône d'Abrams exigées par la norme CSA avec vue de côté à gauche et vue en plan à droite (CSA, 2019) . . . . .	19
2.8	Classes de consistance des bétons en fonction de la mesure de l'affaissement selon la norme belge (NBN EN 206 : 2013+A1 : 2016 et NBN B 15-001 : 2018) .	20
2.9	Appareillage d'un consistomètre Vébé modifié (ACI, 2002) . . . . .	22
2.10	Appareillage de l'essai au maniabilimètre L.C.L. (Hu, 1995) . . . . .	23
2.11	Rhéomètre IBB à gauche et schéma du principe de rotation de l'agitateur en H à droite (Berger, 2022) . . . . .	25
2.12	Boucle d'hystérésis due à une plus rapide fluidification que la restructuration d'un matériau (Berger, 2022) . . . . .	25
2.13	Sonde en acier inoxydable (avec la permission de <i>Command Alkon</i> ) . . . . .	28
2.14	Détails du système embarqué pour bétonnière (Siccardi, 2022) . . . . .	29
2.15	Exemple d'informations accessibles avec les graphiques en ligne sur <i>TrackIt</i> .	31
2.16	Emplacement du moteur hydraulique sur les camions malaxeurs (Nikolla, 2021)	34

2.17	Équations déterminées pour prédire l'affaissement du béton frais à basse vitesse en fonction de la pression hydraulique nette (Nikolla, 2021) . . . . .	36
3.1	Camion malaxeur de 8 m <sup>3</sup> de <i>Béton Provincial</i> (456) . . . . .	41
3.2	Cône d'Abrams avec bourroir à pointe arrondie . . . . .	41
3.3	Sonde de <i>Command Alkon</i> . . . . .	42
3.4	Capteurs de pression hydraulique <i>Omega</i> . . . . .	43
3.5	Capteur de pression hydraulique dans le boîtier de protection avec l'amortisseur (Nikolla, 2021) . . . . .	44
3.6	Pompe hydraulique manuelle (capacité : 700 bars) . . . . .	45
3.7	Graphique de calibration pour le capteur PX359-3KG10V . . . . .	45
3.8	Installation d'un capteur de pression sur le moteur hydraulique d'un camion malaxeur (Nikolla, 2021) . . . . .	46
3.9	Système embarqué sur un camion malaxeur (Nikolla, 2021) . . . . .	47
3.10	Exemple de données brutes analysées avec le code <i>Python</i> . . . . .	48
3.11	Exemple de données filtrées obtenues en utilisant une moyenne mobile avec le code <i>Python</i> . . . . .	48
3.12	Exemple de données filtrées avec Excel durant 1 journée . . . . .	50
3.13	Évolution de la vitesse de rotation durant 1 journée . . . . .	50
3.14	Pression hydraulique en fonction de la vitesse de rotation de la toupie à vide du camion de production de <i>Béton Provincial</i> à Québec (456) . . . . .	51
4.1	Mesures de pression hydraulique nette à haute vitesse de rotation en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	54
4.2	Mesures de pression hydraulique nette à haute vitesse de rotation avec facteur de $\frac{1}{2}$ pour les camions de 12,5 m <sup>3</sup> en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	55
4.3	Mesures de pression hydraulique nette à basse vitesse de rotation avec facteur de $\frac{1}{3}$ pour les camions de 12,5 m <sup>3</sup> en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	56
4.4	Variation du pourcentage de remplissage du camion-toupie entre 60 et 100 % à basse vitesse de rotation en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	57
4.5	Variation du pourcentage de remplissage du camion-toupie entre 60 et 100 % à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	58



4.6	Comparaison des données 2021 et 2024 pour la pression hydraulique en fonction de l'affaissement (basse vitesse de rotation) . . . . .	59
4.7	Comparaison des données 2021 et 2024 pour la pression hydraulique en fonction de l'affaissement (haute vitesse de rotation) . . . . .	59
4.8	Mesures de pression hydraulique nette à basse vitesse de rotation en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	60
4.9	Mesures de pression hydraulique nette à haute vitesse de rotation en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	61
4.10	Affaissement estimé avec la sonde en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams . . . . .	63
4.11	Affaissement estimé avec le capteur de pression hydraulique à basse vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams . . . . .	64
4.12	Affaissement estimé avec le capteur de pression hydraulique à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams . . . . .	65
4.13	Affaissement estimé en combinant la sonde et le capteur de pression hydraulique à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams . . . . .	66
4.14	Affaissement estimé en combinant la sonde, le capteur de pression hydraulique à basse vitesse de rotation et à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams . . . . .	67
4.15	Moyennes des écarts absolus entre la prédiction et la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	69
4.16	Moyennes des écarts relatifs entre la prédiction et la mesure d'affaissement au cône d'Abrams . . . . .	70
5.1	. . . . .	87

# Liste des tableaux

2.1	Précision de la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (CSA, 2020) . . . .	21
3.1	Équations des pressions hydrauliques à vide pour chacun des camions . . . . .	52
4.1	Équations permettant d'estimer l'affaissement du béton frais en fonction de la pression hydraulique mesurée . . . . .	61
4.2	Récapitulatif du nombre de données et du pourcentage compris dans la norme pour chaque estimation . . . . .	68

# Chapitre 1

## Introduction

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le secteur de la construction, et ce, dans le monde entier. En Amérique du Nord, le volume de béton utilisé durant l'année 2021 est de 25 Mm<sup>3</sup> pour le Canada et pas moins de 300 Mm<sup>3</sup> pour les États-Unis. En comparaison avec d'autres matériaux tels que l'acier ou le bois, le béton est moins conventionnel d'un point de vue de sa fabrication et de son transport jusqu'au lieu de mise en place. En effet, le béton nécessite une attention très particulière lors de sa composition en centrale et ensuite un contrôle précis de ses propriétés lors de son arrivée sur chantier. Le stockage sur chantier ne sera également pas possible pour du béton frais, car celui-ci durcit après un certain temps et sa mise en place devient donc impossible. Un élément en acier pourra par exemple être stocké sans problème sur le chantier en attendant d'être placé, ce qui n'est pas possible pour le béton.

Il est alors important de mettre en place des règles de bonnes pratiques pour la fabrication et le transport de ce matériau dont les propriétés mécaniques ou la durabilité peuvent être affectés par une multitude de facteurs à contrôler. Pour assurer une bonne uniformité dans la construction de l'entièreté de l'ouvrage, il est par ailleurs important que le béton transporté dans chaque camion-toupie ait les mêmes propriétés. Lorsque les propriétés du béton frais ne sont pas celles désirées lors du contrôle sur chantier, l'entièreté du camion peut se voir refusé et donc jeté. À l'heure où les considérations environnementales deviennent de plus en plus importantes dans notre société, de tels gaspillages sont inadmissibles. Ces refus engendrent aussi des pertes économiques pour le fournisseur. Ce genre de situation non désirée induit également une perte de temps considérable pour le chantier et peut bouleverser son bon dé-

roulement.

Des contrôles de qualité et de consistance du béton sont donc très importants afin d'éviter tout problème. Bien plus, utiliser du béton n'ayant pas les propriétés requises pourrait, à long terme, nécessiter des efforts de maintenance plus importants et/ou une réduction de durée de vie de la structure. Effectuer des tests réguliers peut paraître simple sur le papier mais, en réalité, peut s'avérer très coûteux en temps, mais également en argent. Ces tests sont effectués sur des échantillons et donc engendrent en plus un gaspillage de matériau. En ce qui concerne la composition des bétons, d'importants progrès ont été réalisés au cours des dernières décennies. Parmi ceux-ci, on retrouve l'utilisation accrue de compositions spécifiques (bétons autonivelants, bétons à hautes performances, etc.), l'incorporation d'ajouts cimentaires (de différents types et origines : cendres volantes, laitier, poudre de verre recyclée, etc.), la récupération et le recyclage obligatoires des eaux, l'ajout d'adjuvants chimiques améliorés et novateurs, mais aussi l'utilisation de granulats de béton recyclés. Ces innovations peuvent rendre compliqué le contrôle de qualité du béton frais avec les outils actuels.

La première livraison de béton prêt à l'emploi en Amérique du Nord a vu le jour en 1913 à Baltimore aux États-Unis. Suite à cela, les premières bétonnières ont été inventées dans les années 1920 (Anderson & Dewar, 2003). Deux exemples sont visibles sur la FIGURE 1.1. Le principe même de la production du béton n'a pas beaucoup évolué depuis sa création. Le principe de gâchée sèche qui est utilisé dans 90% des usines de production de béton en Amérique du Nord (Siccardi, 2022) consiste à charger les matériaux secs dans la bétonnière et ensuite malaxer le tout en y ajoutant la quantité d'eau requise.

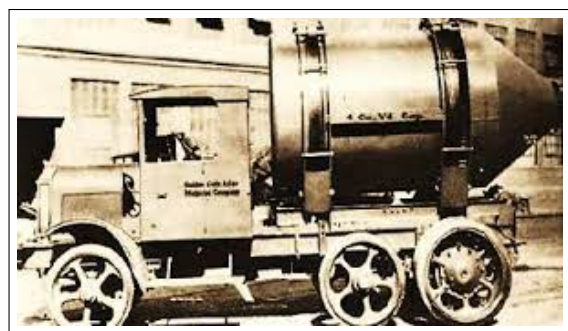
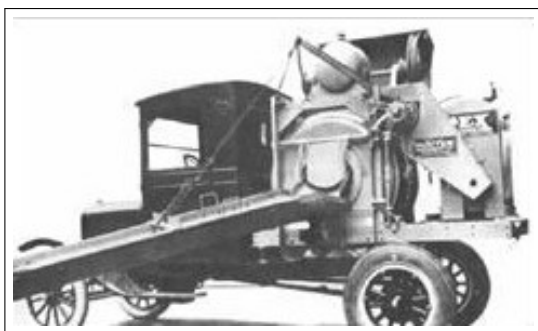


FIGURE 1.1 – Bétonnières dans les années 1920 (concreteconstruction.net, 2006)

Dans le cadre d'un projet de recherche impliquant divers organismes (Siccardi, 2022), des efforts considérables sont déployés pour améliorer les procédés de fabrication et de transport du béton prêt à l'emploi au Canada. Une solution émergente consiste en l'utilisation de systèmes de surveillance embarqués dans les camions toupies. Ces systèmes sont équipés de capteurs intégrés, tels que des sondes d'ouvrabilité, des capteurs de température et des accéléromètres, permettant de collecter un large éventail d'informations sur le béton en transit.

Traditionnellement, l'évaluation de la maniabilité du béton frais repose principalement sur des tests tels que l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, qui, bien qu'utile, ne capture qu'un échantillon limité du mélange. Pour améliorer la qualité et la représentativité de ces évaluations, il est essentiel de développer de nouveaux outils qui prennent en compte l'ensemble du chargement dans le camion, de manière continue.

Ce besoin est particulièrement crucial dans le contexte des usines à gâchée sèche, où le malaxage et l'ajustement d'eau sont effectués directement dans le camion malaxeur. Intégrer des capteurs avancés dans ces camions offre la possibilité de surveiller en temps réel des paramètres clés tels que le volume chargé, la quantité de béton restante, la vitesse et le sens de rotation du tambour, ainsi que les propriétés du béton frais. Un exemple prometteur de système embarqué est celui développé par *Command Alkon* (<https://commandalkon.com/>), déjà bien établi aux États-Unis. Ce système permet une mesure continue de l'affaissement du béton dans la toupie, mais des améliorations sont nécessaires pour garantir une précision suffisante, en particulier pour les mélanges à faible maniabilité. L'intégration d'une deuxième méthode de mesure automatisée (Nikolla, 2021) pourrait renforcer cette précision et ainsi améliorer la fiabilité des évaluations sur le terrain.

L'utilisation de ces systèmes embarqués associés à des technologies GPS existantes offre un potentiel considérable pour optimiser l'acheminement du béton sur les chantiers. En réduisant le temps de malaxage nécessaire dans les camions, ces systèmes permettent non seulement des économies de carburant et de temps, mais également une meilleure prévision de l'affaissement du béton à l'arrivée sur le chantier, réduisant ainsi les déchets de béton et améliorant l'efficacité globale du processus. Ces avancées ont une importance cruciale d'un point de vue économique, environnemental et social, en particulier dans le contexte actuel de crise environ-

nementale où la réduction des déchets à la source est essentielle pour une production durable de béton.

## **Objectif de recherche**

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'améliorer la méthode d'estimation en continu de l'affaissement du béton frais pour une large gamme de maniabilités de béton et pour une large gamme de vitesses de rotation du malaxeur. Le travail s'effectuera à l'aide de deux capteurs intégrés dans les camions toupies : le premier est le capteur *Command Alkon* qui est bien implémenté dans l'industrie et le deuxième est un capteur de pression hydraulique qui a été le sujet d'un projet de recherche mené par Denis Nikolla (ULaval) en 2021. Les données récoltées grâce à ces deux capteurs seront les éléments clés de ce travail de recherche.

## **Question de recherche**

Sur base de l'objectif principal de ce travail de fin d'études, la question de recherche suivante peut être formulée :

Quelle technique utiliser pour combiner les mesures du capteur de pression hydraulique et du capteur intégré *Command Alkon* en vue de prédire l'affaissement pour une large gamme de maniabilités du béton et pour une large gamme de vitesses de rotation du malaxeur ?

Bien que cette question pourrait faire l'objet de deux projets séparés en ce qui concerne la large gamme de maniabilités du béton et la large gamme de vitesses de rotation du malaxeur, ce projet de recherche tente de répondre de manière globale à la question de recherche.

## **Structure du document**

Suite à cette brève introduction, le deuxième chapitre permet de passer en revue l'ensemble des connaissances actuelles sur la maniabilité du béton frais ainsi que les différents projets de recherche déjà menés. Ensuite, la méthodologie est développée dans le chapitre 3 en expliquant comment les données ont pu être récoltées et quels sont les instruments de mesures mis en place. Le quatrième chapitre discute des résultats obtenus grâce aux données

récoltées et l'amélioration de l'estimation de l'affaissement à l'aide des deux capteurs. Pour finir, une conclusion passe en revue l'ensemble du rapport pour formuler des recommandations et discuter de l'objectif principal du projet de recherche.

# Chapitre 2

## État de l’art

### 2.1 Introduction

Pour cerner au mieux les objectifs et l’origine de ce travail de recherche exposé dans ce document, il est important d’approfondir les connaissances actuelles sur le béton frais et sa maniabilité. Pour cela, le chapitre suivant remet en contexte les différentes étapes de la production du béton en allant de l’usine de production à la livraison du béton en passant par le transport du béton prêt à l’emploi. Il faut pour cela bien distinguer les deux pratiques de malaxage mises en place dans les usines de production à l’heure actuelle. La phase de malaxage sera développée tant pour les gâchées sèches que pour les gâchées humides. La rhéologie du béton est brièvement introduite en début de chapitre pour mieux appréhender le reste du document.

Par la suite, les différents facteurs qui peuvent influencer la maniabilité du béton frais seront explicités, la qualité de production du béton frais est également perturbée par ces facteurs. À la fin de cet état de l’art, les différentes méthodes de mesure de l’ouvrabilité du béton frais sont introduites. Lorsque les principales méthodes auront été expliquées, il sera plus facile de bien comprendre la pertinence du travail de recherche qui consiste à prédire la mesure d’affaissement à l’aide d’un système de capteurs embarqués dans les camions malaxeurs.



### 2.1.1 Rhéologie du béton

La rhéologie est le domaine de la science qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière soumise à une certaine contrainte (Roussel et al., 2012). Cela fait maintenant plusieurs décennies que le comportement rhéologique des matériaux frais à base cimentaire est un domaine de recherche important. Ce domaine assez complexe a facilité la caractérisation plus précise des comportements d'écoulement du béton, ouvrant ainsi la porte au développement de bétons spéciaux comme les bétons pompables et les bétons autoplacants. Comme représenté sur la FIGURE 2.1, le béton est admis dans la littérature scientifique comme étant un fluide non newtonien qui peut s'apparenter au modèle rhéologique de Bingham (Ferraris et al., 2017).

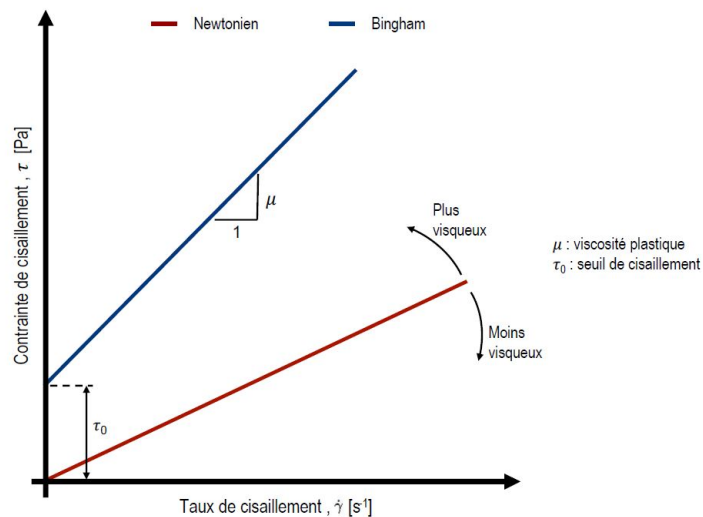


FIGURE 2.1 – Modèle de Bingham (G. Tattersall & Banfill, 1983)

En général, la relation contrainte déformation est utilisée pour caractériser le comportement d'un solide. Cependant, dans le cas du béton fluide, le caractériser comme étant un solide ne serait pas juste. C'est pour cela que le modèle de Bingham est utilisé et il permet de mettre en relation la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) et le taux de cisaillement ( $d\gamma/dt$  ou  $\dot{\gamma}$ ). L'équation suivante correspond à la loi de comportement d'un fluide de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Dans cette équation, l'ordonnée à l'origine correspond au seuil de cisaillement ( $\tau_0$ ) et la pente de la droite de Bingham correspond à la viscosité plastique ( $\mu$ ). À la différence des fluides newtoniens, il faut appliquer un effort minimal pour entamer l'écoulement du fluide de

Bingham et cet effort correspond au seuil de cisaillement. Un certain nombre de paramètres peuvent influencer la rhéologie du béton frais : ceux-ci sont représentés sur la FIGURE 2.2 (Ferraris et al., 2017).

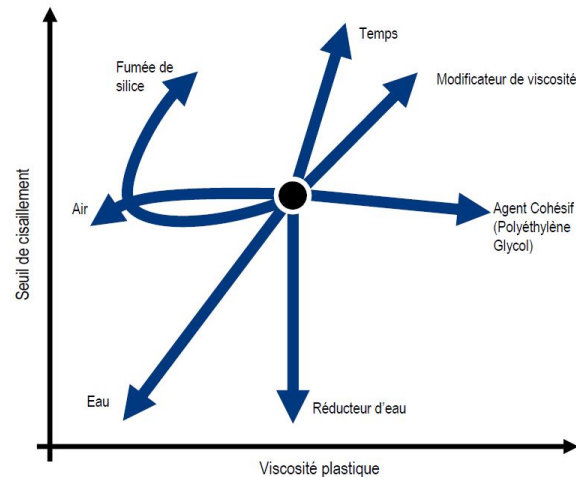


FIGURE 2.2 – Influence semi-quantitative de l'accroissement de certains paramètres sur la rhéologie d'un mélange de béton frais (Ferraris 2017)

Remarquons que la modification de la concentration de certains constituants comme l'eau et le réducteur d'eau affecte le seuil de cisaillement, mais sans influencer de la même manière la viscosité du béton frais. Il est intéressant de comprendre les principes de base de la rhéologie du béton afin de mieux comprendre et distinguer les différentes méthodes permettant de mesurer la maniabilité.

### 2.1.2 Usine de production du béton

Afin de produire du béton ayant les propriétés demandées par le client, la composition de celui-ci doit être formulée dans un laboratoire qui déterminera le dosage de chacun des constituants. Une fois cette composition mise au point, elle sera transmise à l'usine de production pour la réaliser. Le béton frais est toujours constitué de granulats, de sable, de ciment et d'eau, il est parfois nécessaire d'y ajouter des adjuvants sous forme liquide ou sous forme de poudre. Au Canada, les propriétés des constituants doivent être surveillées rigoureusement à l'aide d'outils de contrôle. En effet, avec les précipitations et les variations de température conséquentes, la teneur en eau des granulats stockés peut varier fortement. Cette variation n'est pas négligeable pour la composition du béton frais et peut modifier les propriétés de-

mandées par le client.

Pour effectuer une brève comparaison avec le fonctionnement en Belgique, la certification BENOR a été mise en place il y a plus de 50 ans. Elle permet de garantir qu'un contrôle très strict a été effectué sur le béton en sortie de l'usine de production. Pour le béton, BENOR permet de supprimer l'essai d'affaissement au cône d'Abrams sur chantier. Un béton certifié assure au client que le matériau répond aux différentes normes (NBN EN 206 : 2013+A1 : 2016 et NBN B 15-001 : 2018) et permet à celui-ci de se concentrer uniquement sur la mise en place du matériau. Ce principe pourrait difficilement être mis en place au Canada, car les conditions de transports sont plus complexes qu'en Belgique avec notamment des variations de températures importantes et des distances à faire plus grandes. En effet, la température a un impact non négligeable sur le béton frais.

### **2.1.3 Malaxage**

Le principe du malaxage consiste à cisailer le béton à l'aide des éléments mécaniques du malaxeur en vue de disperser les constituants de la manière la plus homogène possible. Il faut que les matériaux soient bien déstructurés pour ne pas favoriser l'un d'entre eux (Charonnat & Beitzel, 1997). La qualité et les performances du béton durci sont impactées significativement par l'efficacité du malaxage. Il existe deux grandes sortes d'usines ayant chacune sa propre méthode de malaxage : les usines à gâchée sèche et les usines à gâchée humide. Les deux méthodes sont bien distinctes bien qu'un mélange des deux soit possible.

#### **2.1.3.1 Gâchées sèches**

La première méthode de production du béton frais, la plus répandue en Amérique du Nord, consiste à peser et à déverser les constituants (granulats, sable, ciment et eau) directement dans le camion malaxeur. La capacité du tambour rotatif de ce genre de camion se situe généralement entre 4 et 12 m<sup>3</sup>. Ces tambours rotatifs sont équipés de pales hélicoïdales fixées aux parois qui permettent de cisailer le béton lors du malaxage (FIGURE 2.3). Ces pales qui équipent l'intérieur du tambour rotatif permettent d'entraîner le béton vers le fond du malaxeur pour bien mélanger les constituants lors de l'étape de malaxage. Cette étape de malaxage sert à obtenir une homogénéisation du béton et à contrer les effets de la thixotropie du

béton, qui a tendance à se structurer lorsqu'il est au repos. Le malaxage ne peut s'effectuer que lorsque la rotation est dans le sens horaire vue de l'arrière du camion. En effet, lorsque le tambour tourne dans l'autre sens, le béton aura tendance à remonter et donc à sortir du malaxeur. C'est dans ce sens de rotation du tambour que le camion peut être vidé sans avoir à incliner le tambour. L'axe de rotation est par conséquent légèrement incliné pour éviter que le béton ne déborde et pour en faciliter le malaxage.

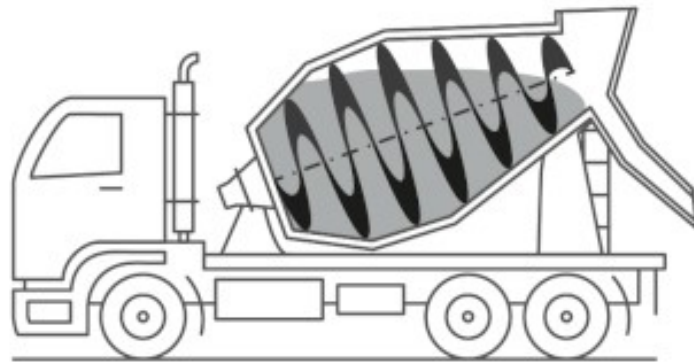


FIGURE 2.3 – Représentation de l'intérieur d'un camion malaxeur (Ambrosetti, 2015)

L'étape de malaxage dans le tambour a été le sujet de plusieurs réflexions en ce qui concerne l'efficacité et le principe même du malaxage. Différents modes d'écoulement du béton frais ont pu être notés. Ces modes d'écoulement peuvent être reliés simplement au nombre de Froude qui caractérise l'importance relative de l'énergie cinétique des particules d'un fluide par rapport à son énergie potentielle gravitationnelle (Poullain, 2003). Le rayon du tambour et la vitesse de rotation impactent directement ce nombre.

Certains modes d'écoulement sont représentés sur la FIGURE 2.4. Lorsque la vitesse de rotation de la toupie est minimale, le mode d'écoulement ressemble à du "glissement". Cependant, lorsque la vitesse est très élevée (22-27 RPM), le mode d'écoulement ressemble plus à de la "centrifugation". Ce mode de malaxage est à éviter pour des raisons évidentes de sécurité. À une vitesse basse inférieure à 3 RPM, il a été observé (Sherritt et al., 2003) lors des malaxages à l'usine que le béton avait un comportement d'"écroulement". Les malaxeurs doivent garder une vitesse de rotation minimale lorsque le camion est à l'arrêt ou en déplacement pour maintenir l'homogénéité et les propriétés du mélange de béton frais.

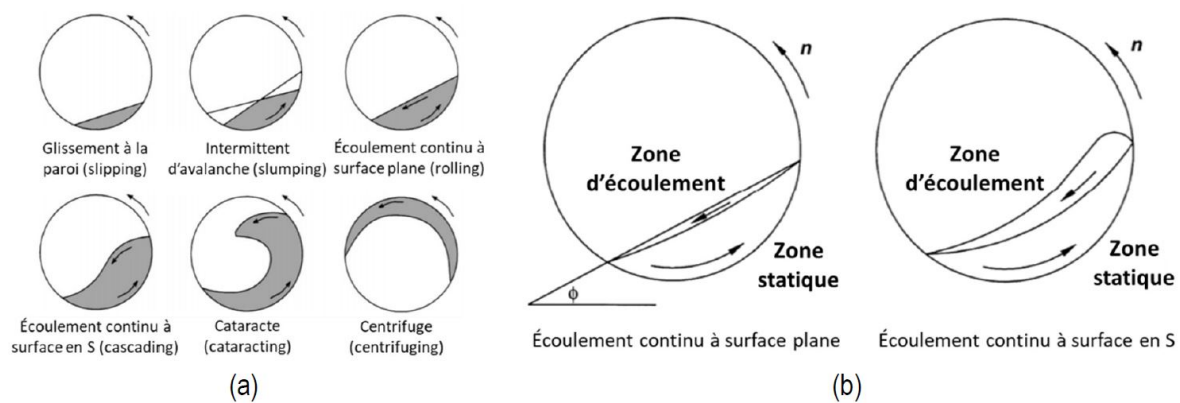


FIGURE 2.4 – (a) Comportement du béton dans la toupie : (b) Zones actives et statiques durant les comportements "roulement" et "cascade" (Sherritt et Al., 2003 et Félix, 2002)

Comme il a été démontré expérimentalement dans plusieurs études, le malaxage du béton est plus efficace à haute vitesse (Lobo & Gaynor, 2006). En effet, le comportement du béton ressemble plutôt au type "roulement" et/ou "cascade" lorsque le malaxeur tourne à haute vitesse (entre 10 et 15 RPM). Ces vitesses élevées de rotation du tambour permettent une meilleure homogénéisation du mélange de béton frais. Sur la partie droite de la FIGURE 2.4, les deux types d'écoulements discutés précédemment sont détaillés. La partie du mélange en contact avec le fond de la cuve suit le mouvement de rotation du tambour (zone statique) jusqu'à atteindre un point de rupture. À partir de ce point de rupture, le béton va s'écrouler sur lui-même et créer la zone active du mélange. Deux facteurs vont impacter la hauteur à laquelle se produit ce point de rupture, la vitesse linéaire et la maniabilité du béton frais. La vitesse linéaire se calcule sur base de la vitesse angulaire et du diamètre de la toupie. Pour le deuxième facteur, lorsque la maniabilité diminue, le coefficient de friction interne du béton augmente, comme la friction entre le béton et la paroi interne du malaxeur (Newman & Choo, 2003). En augmentant la vitesse de rotation durant le malaxage, la hauteur du point de rupture du béton va augmenter et l'écoulement passe du type "roulement" à "cascade".

Dans les normes actuelles, il a été décidé de définir différents paramètres pour caractériser le malaxage, le temps de malaxage, le nombre de tours ou encore la vitesse de rotation du tambour. Par exemple, la norme canadienne CSA 23.1 (CSA, 2019) impose entre 70 et 100 tours à haute vitesse pour homogénéiser le béton frais, et ce, dans le cas d'un malaxage initial en bétonnière. De cette manière, l'efficacité du malaxage n'est pas du tout prise en compte. Il y a encore bien d'autres paramètres qui ne sont pas pris en compte dans ces normes : par

exemple, le niveau d'usure des pales internes ou des pièces mécaniques qui permettent la rotation du tambour. Un autre paramètre qui n'est pas pris en compte est la propreté de l'ensemble du tambour et de ses composants. Des systèmes plutôt bien intégrés dans l'industrie peuvent prendre en considération l'effort que le béton frais exerce sur le malaxeur de manière directe ou non. Placer des sondes à l'intérieur des malaxeurs ou suivre les pressions hydrauliques du système de rotation du tambour sont des solutions qui seront abordées dans l'état de l'art.

#### **2.1.3.2 Gâchées humides**

La seconde méthode de production du béton prêt à l'emploi consiste à utiliser un malaxeur central directement dans l'usine. Les constituants du béton sont dosés et mélangés dans ce malaxeur et sont ensuite transvidés dans le camion malaxeur qui effectuera la livraison jusqu'au chantier. Certaines usines combinent les deux méthodes de malaxage, c'est-à-dire qu'un premier mélange est effectué avec le malaxeur central dans l'usine avec le sable, le ciment, l'eau et les adjuvants si nécessaire, ensuite le malaxage du mortier et des gros granulats se fait dans le camion malaxeur durant le transport. À cause du déplacement relatif des composants à l'intérieur du mélange, les malaxeurs industriels produisent généralement un mélange avec une meilleure homogénéité qu'avec une simple bétonnière. En plus de se vider par une trappe se trouvant au fond de la cuve, les malaxeurs industriels fonctionnent à vitesse constante. Une fois le malaxage opéré dans l'usine, le mélange de béton frais est vidé dans le camion-toupie pour ensuite être acheminé jusqu'au chantier tout en continuant une légère agitation.

#### **2.1.4 Transport et livraison du béton frais**

Dans la norme canadienne CSA A23.1 (CSA, 2019), le temps entre le chargement dans le camion malaxeur et le déchargement complet du béton frais ne doit pas dépasser 120 minutes. Ce temps permet au chauffeur de se rendre jusqu'au chantier, ajuster la maniabilité du béton si nécessaire et finalement décharger le mélange de béton frais. En ce qui concerne l'ajout d'eau pour ajuster la maniabilité du béton, la norme canadienne est plus restrictive que la norme américaine. En plus de ne pas dépasser la teneur en eau maximale et que le temps entre le premier et le dernier ajout ne dépasse pas 15 minutes, la norme canadienne autorise l'ajout d'eau seulement s'il est fait dans les 60 minutes après le gâchage. La quantité d'eau ajoutée ne doit pas dépasser la valeur la plus faible entre 10% de l'eau de gâchage prescrite et

la limite de  $16\text{L/m}^3$ . Lorsque le béton frais arrive au chantier, des ajustements doivent parfois être effectués par le chauffeur du camion en ajoutant de l'eau ou du superplastifiant. Cela dans le but d'obtenir la maniabilité la plus élevée possible tout en restant dans les limites spécifiées par les normes. Le fait d'avoir un béton très maniable apporte certains avantages qui seront expliqués dans la suite de cet état de l'art.

## **2.2 Maniabilité du béton dans l'industrie**

La maniabilité, ou encore l'ouvrabilité du béton frais, est définie dans la norme ASTM C125 (ASTM, 2021) et la norme européenne NBN-EN 206 comme étant la propriété du béton fraîchement mélangé qui affecte la facilité avec laquelle il peut être malaxé, mis en place et consolidé. Cette propriété est importante pour le béton frais et influence la majorité des qualités de l'ouvrage, comme l'apparence, l'étanchéité, la cohésion, les propriétés mécaniques du béton ou encore l'enrobage des armatures. Lors de son arrivée sur le chantier, le chauffeur remet au client un bordereau de livraison stipulant les différentes informations nécessaires concernant le mélange de béton et la maniabilité en fait partie. Pour cela, il faut mesurer l'ouvrabilité du béton sur le chantier pour l'inscrire sur le bordereau qui sera remis à l'acquéreur. Lors de la commande du béton à la centrale, le maître d'ouvrage doit spécifier une plage de mesure d'affaissement ou d'étalement. En ce qui concerne les méthodes possibles pour mesurer cet affaissement, elles seront détaillées dans la suite de ce chapitre. Une multitude de facteurs peuvent influencer la maniabilité du béton frais, ces facteurs doivent être bien pris en compte pour respecter les limites d'affaissement demandées par le client.

### **2.2.1 Facteurs influençant la maniabilité**

Il y a un nombre important de facteurs qui peuvent affecter la maniabilité du béton, voici les principaux : la méthode et la durée du transport, la température, la granulométrie et le type de granulats, le dosage en eau, les propriétés du liant utilisé, le volume d'air dans le mélange,... Parmi les facteurs cités précédemment, le dosage en eau est celui ayant la plus grande influence sur la maniabilité du béton frais. Lorsque le béton est maniable, il est plus facile d'éviter des problèmes lors de sa mise en place. Par exemple, cela permet de garantir un meilleur enrobage des armatures, d'éviter la formation de nids de graviers, mais encore d'accélérer et de faciliter

le travail des ouvriers du chantier qui mettent en place le béton dans les coffrages et qui en font la finition. De manière générale, le chauffeur aura tendance à ajouter le plus d'eau possible durant l'ajustement du mélange pour faciliter la tâche des ouvriers. Le chauffeur visera aussi la valeur maximale d'affaissement spécifiée sur le bordereau de livraison pour accélérer le déchargement de son camion.

À l'inverse de ces facilitations et gains de temps pour les ouvriers, l'ajout d'eau nuit beaucoup aux propriétés mécaniques du béton une fois durci. Effectivement, la résistance en compression du béton est directement inversement proportionnelle au rapport entre la quantité d'eau et la quantité de liant (E/C). Ce lien entre la résistance et le rapport E/C s'explique par le fait qu'une quantité importante d'eau induit une porosité plus élevée dans la pâte de ciment. Cette porosité constitue des points de faiblesses dans le béton d'un point de vue mécanique. En plus de cette perte de résistance, les agents agressifs extérieurs peuvent entrer d'autant plus facilement que la porosité augmente. Ces agents agressifs sont la principale cause de la corrosion des barres d'armature et de la dégradation du béton. D'un autre côté, l'ajout d'eau influence les différentes formes de retrait du béton lors de sa prise, élément qui est également à surveiller. En ce qui concerne la durabilité du béton, il a été démontré que des faibles rapports E/C induisent des bétons plus denses, ce qui est souhaitable pour augmenter la durabilité et qu'il est important d'effectuer correctement la cure du béton (Aïtcin, 2019).

Même si les avantages sont considérables lors de la livraison et de la mise en place du béton, il est important de respecter les indications de la norme CSA A23.1 et la plage d'affaissement demandée par le client sur le bordereau de commande au vu de l'impact que l'ajout d'eau peut avoir sur le béton. Le problème d'ajout d'eau n'est pas beaucoup considéré et est difficile à surveiller avec les outils de contrôle actuels, bien que ce soit un élément important pour la durabilité du béton.

L'ajout d'adjuvants réducteurs d'eau ou de superplastifiants est également un facteur important pouvant influencer la maniabilité du béton frais. Ces polymères hydrosolubles, introduits dans les années 1980, jouent un rôle crucial dans la défloculation des grains de ciment. Leur action repose sur deux mécanismes principaux : d'une part, une répulsion électrostatique qui neutralise les charges électriques à la surface des grains, et d'autre part, une répulsion sté-



rique qui écarte les grains les uns des autres grâce à de longues chaînes moléculaires chargées négativement (FIGURE 2.5). Cela libère l'eau piégée dans les agrégats de ciment, rendant ainsi les bétons très fluides tout en maintenant un faible rapport eau/ciment (E/C). Cependant, lors du processus d'hydratation, des cristaux se forment à la surface des particules de ciment, limitant progressivement l'efficacité de ces superplastifiants en mettant fin à leur effet de répulsion. Cela explique pourquoi ces adjuvants ne sont actifs que pour une courte durée et que la perte d'ouvrabilité est assez rapide (Hu, 1995). Les superplastifiants permettent également d'améliorer l'homogénéité du béton grâce à leur action dispersante (Flatt et al., 2004). En ce qui concerne leur utilisation, ils sont soit ajoutés directement à la centrale de production, soit sur chantier. Toujours en respectant les quantités spécifiées par le maître d'ouvrage, car un surdosage pourrait engendrer des effets indésirables tels que la ségrégation, le ralentissement de la prise, l'entraînement excessif d'air ou encore une réduction de la résistance en compression.

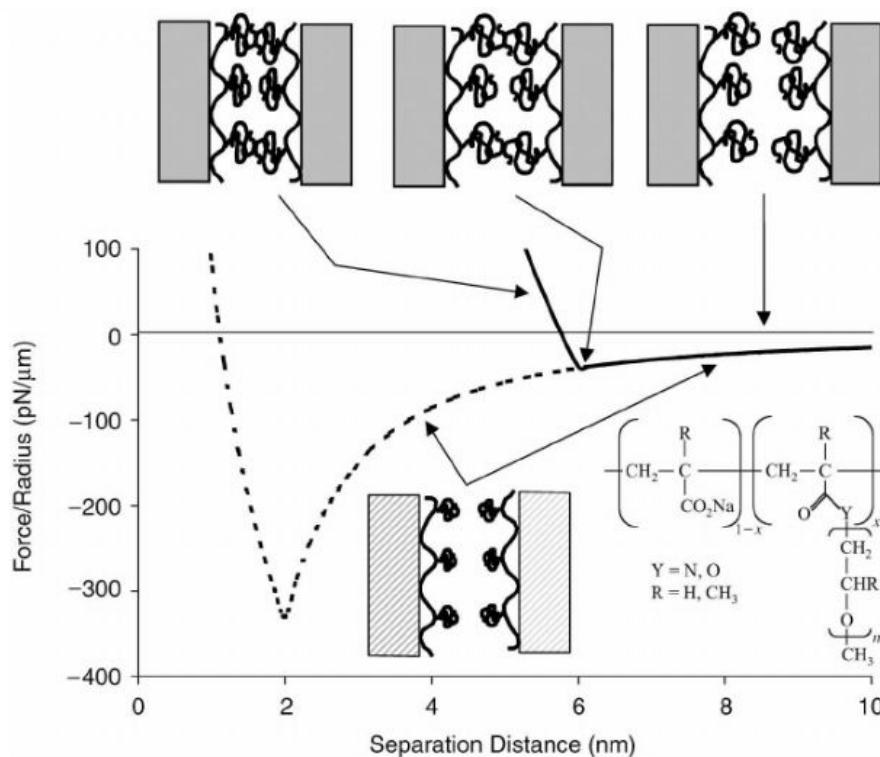


FIGURE 2.5 – Force de répulsion entre deux surfaces de copolymères en fonction de la distance de séparation (Flatt et al., 2004)

## 2.2.2 Qualité du béton frais

Il est clair que la qualité de production du béton frais est directement liée à l'expérience et à l'engagement des ouvriers impliqués dans sa fabrication. Cela est d'autant plus vrai dans

les usines à gâchée sèche, car ce sont les chauffeurs des malaxeurs qui déterminent le temps de malaxage nécessaire à l'homogénéisation du mélange de béton frais ; ils choisissent également la quantité d'eau et d'adjuvants à ajouter pour atteindre la maniabilité et la teneur en air demandées par le client. De plus, les variations fréquentes dans les formulations des différents types de béton disponibles compliquent encore davantage ces ajustements spécifiques à chaque mélange.

Par conséquent, des travailleurs expérimentés sont indispensables pour garantir la qualité des bétons produits. Cependant, la pénurie de main d'œuvre due au vieillissement de la population à laquelle le Québec fait face ne va pas dans le sens de la demande de travailleurs expérimentés. La Commission de la Construction du Québec (CCQ) estime que l'industrie de la construction aura besoin de 13 000 nouveaux travailleurs par an jusqu'en 2025, et que la pénurie de main-d'œuvre persistera jusqu'en 2030 (CCQ, 2019). Le départ à la retraite des ouvriers les plus expérimentés ainsi que la rareté de la main d'œuvre va engendrer des défis importants pour les producteurs de béton dans les années à venir. Si les méthodes de production actuelles ne sont pas améliorées, la production de béton de bonne qualité sera encore plus difficile.

### **2.2.3 Refus du béton sur chantier**

Comme expliqué précédemment, lors de l'ajustement en eau, il est primordial que les limites spécifiées par le maître d'ouvrage soient respectées par les chauffeurs. Comme un surdosage en eau engendre une baisse conséquente des qualités intrinsèques du béton, de sa résistance mécanique et de sa durabilité à long terme, le béton sera automatiquement refusé à cause de sa non-conformité. Il n'y a pas moins de trois sources de production de déchets dans les usines de béton, la première source est le béton qui a été refusé sur chantier et qui est généralement réacheminé jusqu'à l'usine. Les deux autres sources sont le nettoyage de l'usine et le nettoyage des toupies pour empêcher que les résidus de béton frais ne durcissent suite à leur utilisation (Hilt, 2019). Les différentes sociétés de production de béton ne communiquent en général peu ou pas à propos de la quantité de déchets produits. Des études ont quand même été menées afin de mettre des valeurs sur ces quantités de déchets importantes durant les étapes de production du béton prêt à l'emploi. L'estimation se situe entre 165 et 350 millions de tonnes par année, et ce, à travers le monde entier (Iizuka et al., 2017). De plus, ces déchets

ne sont bien entendu pas biodégradables et les quantités importantes en jeu peuvent générer des inquiétudes par rapport à leur stockage et leur élimination.

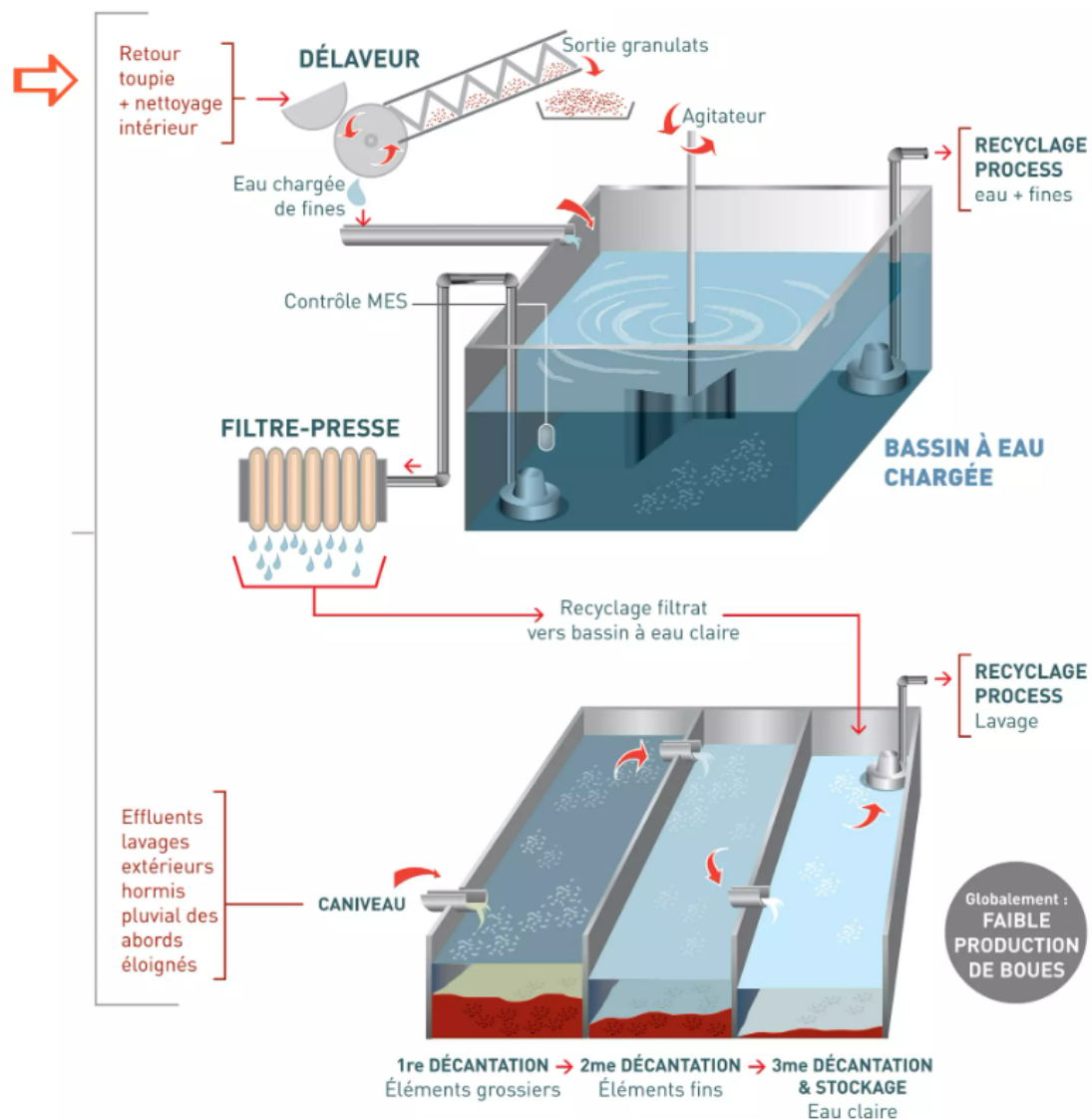


FIGURE 2.6 – Exemple de système de traitement des eaux (Eau Seine Normandie, 2007)

Les déchets qui proviennent des centrales se présentent souvent sous deux formes ; les excédents de béton et les eaux de lavage qui sont très basiques avec un pH d'environ 11,5. Ces déchets sont composés de ciment, de granulats fins et d'adjuvants chimiques. Dans beaucoup de pays, la méthode principale pour éliminer les déchets de béton frais consiste à les enfuir en profondeur dans des décharges. Comme le stipule l'annexe M de la norme (CSA, 2019), le pH élevé du béton frais nuit aux habitats des poissons dans les cours d'eau et les plans de protection de l'environnement devraient prévoir un contrôle pour l'élimination de ces excédents. La solution mise en place par les centrales consiste à créer une série de bassins se succédant pour

augmenter la séparation physique par décantation entre les eaux chargées en particules fines et les granulats (FIGURE 2.6). L'eau qui en résulte est stockée et peut-être réutilisée pour de futurs bétons ou bien simplement pour nettoyer à nouveau les camions malaxeurs. Cependant, les eaux claires recyclées restent très basiques et il faut prendre des précautions lors de leur réutilisation. Différentes études ont été menées sur ces eaux récupérées dans les bassins et il a été prouvé que ces eaux pouvaient contenir des quantités importantes d'espèces ioniques et de polymères qui pourraient dégrader les futures gâchées de béton (Aïtcin & Mindess, 2013). Au vu de la crise environnementale actuelle, préserver les habitats naturels et la qualité des eaux souterraines environnantes doit faire l'objet de réflexions, d'où l'importance de minimiser la production de déchets provenant de la production de béton frais.

## **2.3 Mesure de la maniabilité**

Le béton est un matériau extrêmement complexe, et les caractéristiques qu'il présente à l'état frais ont un impact direct sur ses propriétés une fois durci. Par conséquent, il est crucial d'investir dans le développement de méthodes permettant de caractériser de manière précise les mélanges de béton à l'état frais pour l'avenir. Dans le cadre de ce projet de recherche, il est essentiel d'examiner la rhéologie du béton pour mieux comprendre les différences qu'il peut y avoir entre les diverses méthodes utilisées pour mesurer sa maniabilité.

### **2.3.1 Essai au cône d'Abrams**

Au début des années 1920, le rapport E/C a commencé à être considéré comme important suite à plusieurs recherches, cela a mené au développement d'un essai d'affaissement du béton frais appelé "Cône d'Abrams". Ce nouvel essai est rapidement devenu l'essai le plus utilisé en pratique simplement grâce à son faible coût et sa simplicité de mise en œuvre sur chantier ou en laboratoire. En Amérique du Nord, cet essai doit être réalisé selon les procédures indiquées dans les normes CSA A23.2-5C (2019) ou ASTM C143 (2020). En ce qui concerne l'Europe, la norme équivalente est la norme EN12350-2 ou l'essai VEBE : EN12350-3. La procédure est relativement simple : un échantillon de béton frais est récolté après un malaxage suffisant et est placé en 3 couches dans le moule prévu pour cet essai. Ce moule a la forme d'un cône tronqué de 300 mm de hauteur et ayant un diamètre de 200 mm à sa base et un diamètre de

100 mm à son sommet. La FIGURE 2.7 représente le cône d'Abrams et les dimensions exigées par la norme (CSA, 2019).

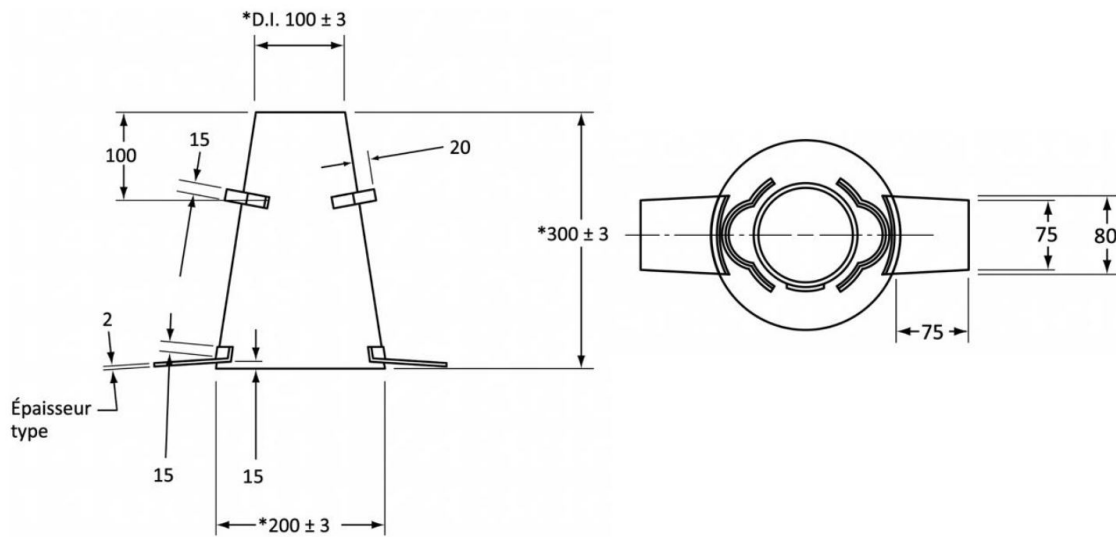


FIGURE 2.7 – Dimensions du cône d'Abrams exigées par la norme CSA avec vue de côté à gauche et vue en plan à droite (CSA, 2019)

Lors du remplissage des couches, 25 coups de bourroir en acier doivent être appliqués sur chacune des couches. Ce bourroir en acier est également normé et doit avoir une pointe sphérique et un diamètre de 16 mm. Une fois ces étapes effectuées, le cône doit être soulevé en plus ou moins 5 secondes et ainsi laisser le béton s'affaisser sous son propre poids, grâce à la gravité. La contrainte la plus importante dans l'échantillon se situe à la base du cône et elle diminue graduellement dans les couches supérieures. S'il n'y a aucun affaissement du béton, cela signifie que la contrainte dans l'échantillon n'a pas dépassé le seuil de cisaillement du béton frais. À l'inverse, si le seuil de cisaillement est atteint, il y a écoulement du béton frais. Étant donné que la hauteur du cône de béton diminue une fois que le cône est soulevé, la contrainte générée par gravité diminue aussi jusqu'à passer sous le seuil de cisaillement et ainsi stopper l'écoulement du béton frais (Roussel & Coussot, 2006). Il suffit ensuite de mesurer la distance verticale entre la hauteur initiale du cône et la position du sommet du cône de béton affaissé, comme illustré sur la FIGURE 2.8 la valeur mesurée correspond à l'affaissement du béton. L'affaissement relatif qui est mesuré à l'aide de cette méthode est défini par la norme CSA comme étant "La mesure de la consistance du béton de ciment hydraulique, du mortier et du stuc fraîchement mélangé, égale au retrait de l'éprouvette moulée mesuré à 5 mm près immédiatement après l'enlèvement du cône d'Abrams" (CSA, 2019). Une norme belge identifie

plus précisément 5 classes de consistance du béton en fonction de l'affaissement mesuré à l'aide du cône d'Abrams. La FIGURE 2.8 schématise ces 5 classes en allant d'un béton très ferme (S1) à un béton très fluide (S5).

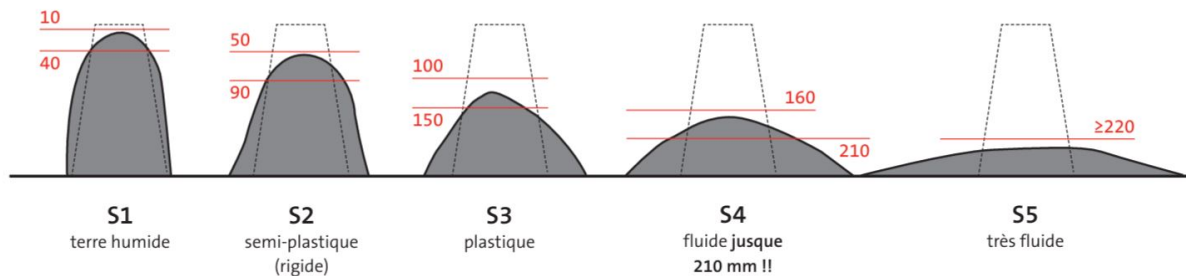


FIGURE 2.8 – Classes de consistance des bétons en fonction de la mesure de l'affaissement selon la norme belge (NBN EN 206 : 2013+A1 : 2016 et NBN B 15-001 : 2018)

Cependant, cet essai a des limites, lorsque le béton devient très fluide suite à un ajout de superplastifiant ; par exemple, la méthode standard au cône d'Abrams devient inadaptée. Effectivement, les bétons fermes et fluides sont plus propices à cet essai à cause d'une mauvaise sensibilité et répétabilité pour les bétons très fermes ou très fluides (Hu, 1995). Dans le cas de béton très fluide, également appelé béton autoplacant, une autre mesure peut être prise pour mieux caractériser le béton. Cette mesure est appelée l'étalement et consiste à mesurer le diamètre de la masse de béton affaissée. Il existe également une classification belge allant de F1 pour les bétons très fermes à F6 pour les bétons très fluides (NBN EN 206 : 2013+A1 : 2016 et NBN B 15-001 : 2018).

Cependant, l'opérateur mettant à l'œuvre l'essai peut influencer la prise de mesure, ce qui fait de la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams une méthode assez imprécise. Pour cela, la norme (CSA, 2019) indique une fourchette de différence acceptable ( $d_{2s}$ ) entre deux mesures d'affaissement qui ont été prises sur un même mélange de béton. Le béton doit impérativement provenir de la même gâchée et les écarts possibles sont repris dans la TABLE 2.1.

TABLE 2.1 – Précision de la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (CSA, 2020)

Affaissement et indice	Écart type (1s)* (mm)	Fourchette acceptable entre deux résultats (d2s)* (mm)
Précision opérateur unique		
Affaissement 30 mm	6	17
Affaissement 85 mm	9	25
Affaissement 160 mm	10	28
Précision laboratoires multiples		
Affaissement 30 mm	7	20
Affaissement 85 mm	10	28
Affaissement 160 mm	13	37

\* Ces chiffres représentent les limites 1s et 2s décrites dans l'ASTM C670

Les mesures doivent être prises à moins de quatre minutes d'intervalle, et ce, soit par un même opérateur, soit par deux laboratoires différents. De plus, le tableau fournit également l'écart-type pour chaque valeur moyenne d'affaissement, dans le cas d'un seul opérateur (1s).

Après 100 ans d'utilisation des mêmes méthodes pour mesurer la maniabilité du béton, l'apparition de mélanges modernes pouvant contenir des adjuvants chimiques peut sembler problématique pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Effectivement, dans certains cas, une valeur d'affaissement peut être la même pour deux gâchées de béton frais et sans pour autant avoir le même comportement, car ils n'ont simplement pas les mêmes propriétés rhéologiques (Hu, 1995). Pour reprendre le principe de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams, la mesure est prise une fois que le béton se stabilise. Cet essai ne prend en compte qu'un seul paramètre de l'écoulement du béton frais, qui n'est autre que le seuil de cisaillement. La mesure d'affaissement au cône d'Abrams est une méthode qui a été classée dans la catégorie des essais à point unique, car la mesure ne fournit qu'une partie de l'information pour caractériser l'écoulement du béton frais, ou sa rhéologie (Koehler & Fowler, 2003).

### 2.3.2 Essais empiriques alternatifs

Afin de s'adapter aux différents procédés de mise en place et de transport du béton (camions malaxeurs, pompage, projection, vibration,...), la manière de mesurer l'ouvrabilité du béton frais a dû évoluer. À l'heure actuelle, une multitude de méthodes existe pour mesurer la maniabilité du béton frais. En plus de mesurer le seuil de cisaillement comme l'essai au

cône d'Abrams, ces autres méthodes prennent en compte la viscosité plastique ou d'autres paramètres. Ces essais, appelés essais à points multiples par Koehler, permettent de mieux caractériser les mélanges de béton. Deux chercheurs ont pu recenser pas moins de 61 méthodes à point unique et à point multiples qui permettent de caractériser l'ouvrabilité du béton à l'état frais (Koehler et Fowler, 2003). Bien que les essais à point unique ne permettent pas de mesurer l'entière des paramètres rhéologiques du béton, ils sont très appropriés dans certaines applications et également pour certains types de mélanges. Ce type d'essai est généralement facile à mettre en œuvre et l'utilisation est simple en comparaison à d'autres essais à points multiples qui sont généralement très encombrants et peu adaptés à une utilisation sur chantier.

Le consistomètre Vébé modifié par l'ACI 211.3R-02 (ACI, 2002) est un autre essai à point unique qui est généralement très utilisé pour des bétons visqueux ou de faible ouvrabilité. La FIGURE 2.9 montre l'appareillage du consistomètre, son principe est simple et consiste à mesurer l'affaissement au cône d'Abrams à l'intérieur d'un récipient cylindrique.



FIGURE 2.9 – Appareillage d'un consistomètre Vébé modifié (ACI, 2002)

Une fois le cône d'Abrams retiré, la table vibrante sur laquelle le contenant est posé va permettre d'aplanir complètement la face supérieure du béton grâce à un disque transparent disposé au-dessus du béton et qui va accompagner la descente pendant le compactage. La valeur de consistance Vébé est égale au temps écoulé afin de compacter le béton. Cette valeur est exprimée en secondes et plus celle-ci est élevée, plus le béton est ferme, car le temps de



compactage est plus important.

Avec un système de vibration permettant de reproduire au laboratoire les conditions de mise en place du béton sur chantier, le maniabilimètre LCL normalisé par la norme NFP 18-452 (AFNOR, 2017) est très répandu. Le principe est sensiblement similaire à l'essai précédent, la différence réside dans le fait que le cône d'Abrams n'est plus utilisé pour disposer le béton frais dans l'appareillage. La FIGURE 2.10 est un schéma du système. Le béton va s'écouler grâce à la vibration d'une fréquence de 50 Hz et le temps mis pour atteindre le repère placé sur la paroi à côté du vibreur correspond à la valeur de consistance du béton frais. Comme précédemment, cette méthode est mieux adaptée pour les bétons à faibles maniabilités. Cependant, l'essai est sensible et reproductible pour une vaste plage de dosages en eau puisque c'est un essai dynamique. Un échantillonnage de 30 L est nécessaire pour être réalisé. Cela est favorable pour la représentativité de l'essai comparé au 6 L du cône d'Abrams, mais est moins favorable pour son utilisation sur chantier avec un appareillage pesant une centaine de kilogrammes.

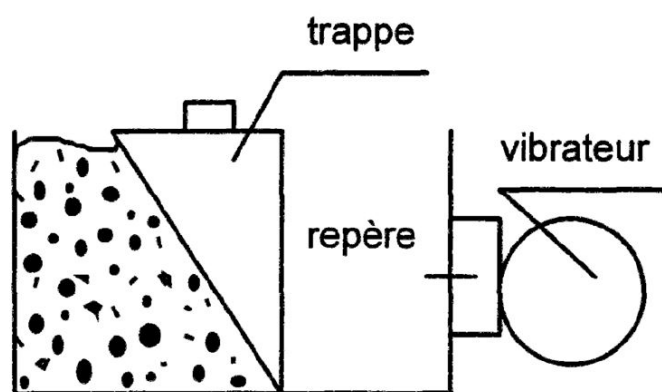


FIGURE 2.10 – Appareillage de l'essai au maniabilimètre L.C.L. (Hu, 1995)

Ces essais permettent non pas de mesurer "la consistance" d'un béton, mais ils permettent de mesurer "une consistance" de ce béton (Baron & Lesage, 1976). En effet, des résultats contradictoires peuvent être obtenus en fonction de l'appareillage utilisé. Un projet de recherche a consisté à effectuer des mesures d'ouvrabilité avec d'une part le maniabilimètre LCL et d'autre part le cône d'Abrams, et ce, pour une multitude de formules de béton différentes (Baron et al., 1982). Suite à cette série d'essais, il a été démontré qu'un béton pouvait avoir un affaissement plus important qu'un autre au cône d'Abrams, mais sans forcément s'affaisser plus vite au maniabilimètre LCL. Il faut en conclure que l'utilisation d'un seul essai

empirique à point unique pour caractériser l'ouvrabilité et la consistance des mélanges de béton frais n'est pas suffisante. Il serait plus intéressant et plus précis d'utiliser des essais à points multiples pour déterminer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique et ainsi éviter une caractérisation incomplète ou erronée des bétons frais.

### **2.3.3 Rhéomètre**

Afin de mesurer les paramètres rhéologiques d'un béton, un rhéomètre est généralement utilisé. Cependant, il existe sur le marché différents modèles de rhéomètres rotatifs composés d'hélices de géométries variées. Les valeurs des paramètres rhéologiques mesurées à l'aide de ces équipements sont exprimées dans des unités arbitraires en fonction de la procédure de l'essai et de l'équipement utilisé. Les propriétés rhéologiques d'un béton ont été mesurées avec 5 rhéomètres utilisés couramment dans les laboratoires, ces résultats ont été obtenus lors de deux campagnes de grande envergure (Ferraris & Lynn, 2003). Ces campagnes ont permis de conclure que le niveau de corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du béton entre chacun des rhéomètres utilisés est assez élevé. Des relations ont pu être proposées pour corréler les résultats entre des rhéomètres avec un niveau de confiance de 95 %.

Parmi les cinq rhéomètres utilisés dans ces campagnes expérimentales, un rhéomètre appelé IBB a été utilisé. Ce rhéomètre a été développé par Beaupré en 1994; il est composé d'un agitateur en forme de H qui est en rotation planétaire dans le mélange de béton frais. Un capteur installé sur l'axe principal permet d'enregistrer le couple appliqué et un autre capteur de vitesse permet de contrôler l'agitation planétaire pendant toute la durée de l'essai. La FIGURE 2.11 montre en détail l'appareillage mis en place pour réaliser cet essai.

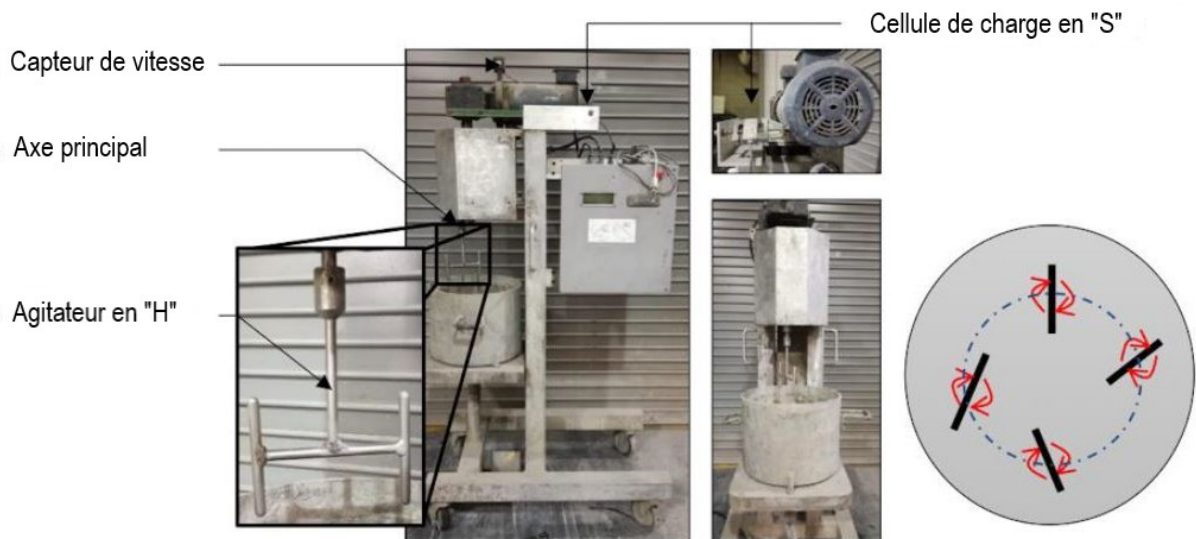


FIGURE 2.11 – Rhéomètre IBB à gauche et schéma du principe de rotation de l'agitateur en H à droite (Berger, 2022)

Durant l'essai, l'appareil suit un protocole rhéologique précis, étant donné que la réponse du béton est influencée par son historique de cisaillement. Il est important de rappeler que le béton est un matériau thixotropique, ce qui signifie qu'il s'écoule plus facilement lorsqu'il est agité et qu'il retrouve sa structure initiale au repos. Comme il est représenté sur la FIGURE 2.12, la restructuration du matériau qui prend plus de temps que sa fluidification crée une boucle d'hystérésis.

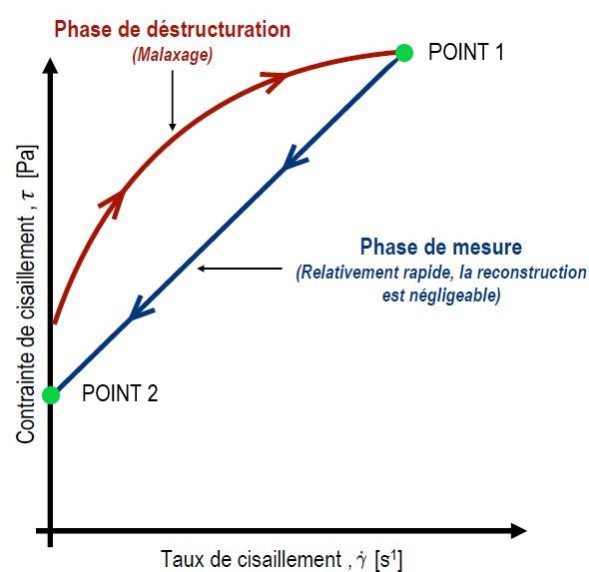


FIGURE 2.12 – Boucle d'hystérésis due à une plus rapide fluidification que la restructuration d'un matériau (Berger, 2022)

Sur base de cette courbe, il est possible d'observer la première phase de l'essai rhéologique qui permet de déstructurer le béton en le malaxant avec une vitesse élevée de rotation de l'agitateur en H. Lorsque la déstructuration est finie, le premier point à haute vitesse est relevé. La deuxième phase consiste à diminuer progressivement le taux de cisaillement et ainsi déterminer le deuxième point à basse vitesse. Ces deux points permettent de déterminer les paramètres rhéologiques en traçant la droite passant par ces deux points. La pente de cette droite correspond à la viscosité plastique et l'ordonnée à l'origine correspond au seuil de cisaillement. Le principe de fonctionnement de ce test appelé "Two point test" a été suggéré par Tattersall & Banfill (1983). L'inconvénient majeur de cette méthode est le manque de précision dans la déduction de la droite de Bingham sur base de seulement deux points. Pour résoudre cela, une multitude de données est enregistrée entre ces deux points par le rhéomètre IBB afin de visualiser la droite linéaire entre le couple (N.m) et la vitesse de rotation (RPM).

La rhéologie offre une perspective plus complète dans la caractérisation du béton frais par rapport aux tests à point unique précédemment évoqués. Ces connaissances supplémentaires sont importantes pour ajuster les mélanges avec précision et fournir des informations plus précises aux acteurs impliqués dans la formulation des mélanges ou lors de situations comme le refus du béton sur chantier. Néanmoins, les coûts élevés et l'inefficacité de ces équipements sur le terrain, à cause de problèmes de transport et de leur complexité d'utilisation, les rendent moins attrayants que les tests simples tels que l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, même si ce dernier est moins exhaustif. C'est pourquoi plusieurs recherches ont été entreprises pour proposer d'autres méthodes permettant de déterminer les paramètres rhéologiques des bétons frais. Dans cette optique, les recherches sur les systèmes automatisés ont commencé au cours des dernières années, sujet qui sera abordé à la section suivante.

### **2.3.4 Systèmes automatisés**

Pour résoudre les problèmes cités précédemment, l'utilisation de systèmes automatisés embarqués permettrait de suivre l'ouvrabilité du béton frais à l'intérieur du camion malaxeur sans devoir prélever un échantillon pour effectuer les essais et ne nécessiterait pas d'intervention humaine. L'intégration de ces systèmes permettrait également de livrer du béton prêt à l'emploi de qualité ne dépendant plus des compétences du chauffeur, ce qui est un plus pour les

producteurs de béton. En effet, comme discuté plus tôt, l'industrie de la construction devrait faire face à un manque de main-d'œuvre jusqu'au moins 2030.

Ce genre de système peut utiliser, par exemple, la relation entre la force de traînée engendrée par une sonde en mouvement à travers le béton frais et sa vitesse de déplacement pour évaluer les propriétés rhéologiques du mélange. Il convient de mentionner ici les travaux effectués par Mokéddem (2012) dans lesquels il a utilisé une sonde Viscoprobe installée dans le malaxeur d'une centrale à béton pour récupérer les propriétés du béton frais. En se basant sur le modèle de Bingham, un développement théorique a été proposé dans ce travail afin de corréler la vitesse de déplacement d'une sonde sphérique immergée dans le béton avec la force de traînée qui en découle. Cependant, les mesures rhéologiques que Mokéddem a déterminées ont été exprimées en unités fondamentales dans une équation de la force de traînée relativement complexe. Cette équation a ensuite été reformulée pour un fluide de Bingham par Berger (2022), ce qui donne :

$$F_t = G_t + H_t \cdot N \quad (2.2)$$

Le terme  $F_t$  (N) correspond à la force de traînée appliquée sur la boule submergée dans le béton. Dans le terme de droite,  $G_t$  correspond au seuil de cisaillement,  $H_t$  à la viscosité plastique et  $N$  à la vitesse de déplacement de la sonde. Dans les dernières années, d'autres appareils ont vu le jour sur base du même principe. Par exemple, Beaupré (2012) a développé la sonde IBB qui est installée directement dans le tambour des camions toupies. Cet appareil permet de caractériser les bétons frais en continu et est très prometteuse. Ensuite, *Command Alkon*, qui est un leader mondial dans les solutions technologiques pour les fournisseurs de béton prêt à l'emploi, a fait l'acquisition de la sonde IBB.

### 2.3.5 Système embarqué de *Command Alkon*

Le bon fonctionnement du système embarqué de *Command Alkon* est assuré par plusieurs composantes essentielles qui travaillent ensemble pour que la prise de mesures sur les bétons frais soient possibles. L'élément principal et indispensable de ces composantes est la sonde en acier inoxydable qui est illustrée sur la FIGURE 2.13. Cet appareil est installé directement sur la surface interne du camion afin que celui-ci soit en contact direct avec le mélange

de béton. La sonde contient à l'intérieur de sa coquille métallique une multitude de capteurs qui composent le système de mesure. Parmi ces capteurs, trois accéléromètres permettent de connaître en tout temps son orientation et sa vitesse de déplacement. Afin de connaître la température du béton dans la toupie, un thermistor est également installé dans la coquille. Finalement, la sonde est constituée de cellules de charge qui mesurent la déformation sur la partie déformable de la sonde. Lorsque celle-ci est en contact avec le béton à chaque révolution du malaxeur, la partie déformable est soumise à un effort de flexion. L'amplitude de l'effort enregistré par le capteur va dépendre de plusieurs facteurs. En effet, la vitesse de rotation du malaxeur et l'ouvrabilité du béton frais vont avoir un impact significatif sur la mesure prise par le capteur. L'effort mesuré doit être converti dans des unités de pressions connues pour faciliter la comparaison des résultats avec d'autres appareils de mesures similaires. Un brevet (Beaupré et al., 2019) spécifie l'ensemble des détails à propos du fonctionnement de la sonde.



FIGURE 2.13 – Sonde en acier inoxydable (avec la permission de *Command Alkon*)

Grâce au déplacement de la sonde à l'intérieur du malaxeur, il est possible d'évaluer plusieurs propriétés intéressantes du béton et cela permet de contrôler la qualité en continu sans avoir à récupérer un échantillon pour effectuer des mesures manuelles. Un exemple est le volume de béton : en se basant sur l'angle d'entrée et de sortie de la sonde dans le mélange, il est possible d'estimer le volume de mélange que contient le malaxeur. Un autre paramètre important que la sonde permet de mesurer est la température. Ce paramètre doit suivre des

exigences spécifiques de la norme CSA. Comme cet outil de mesure se base sur les mêmes principes que les rhéomètres, les propriétés rhéologiques du béton (seuil de cisaillement et viscosité) peuvent être mesurées. En plus de ces paramètres intéressants, une valeur d'affaissement du béton peut être estimée en corrélant la vitesse de rotation du malaxeur et la force appliquée par le béton sur la sonde.

Pour permettre au système de fonctionner et s'assurer que les mesures soient prises de manière continue, des batteries rechargeables permettent d'alimenter la sonde. Ces batteries sont rechargées par un panneau solaire installé sur la paroi externe de la toupie. Ensuite, les données sont transmises par Bluetooth à un boîtier de communication qui est quant à lui placé dans la cabine du camion. Le chauffeur est équipé d'une tablette qui permet d'afficher les propriétés mesurées sur le mélange, mais un afficheur LED installé à l'arrière du camion affiche également ces propriétés pour faciliter le travail du chauffeur lorsque celui-ci ne se trouve plus dans sa cabine. Les éléments composants le système intégré *Command Alkon* sont visibles sur la FIGURE 2.14.

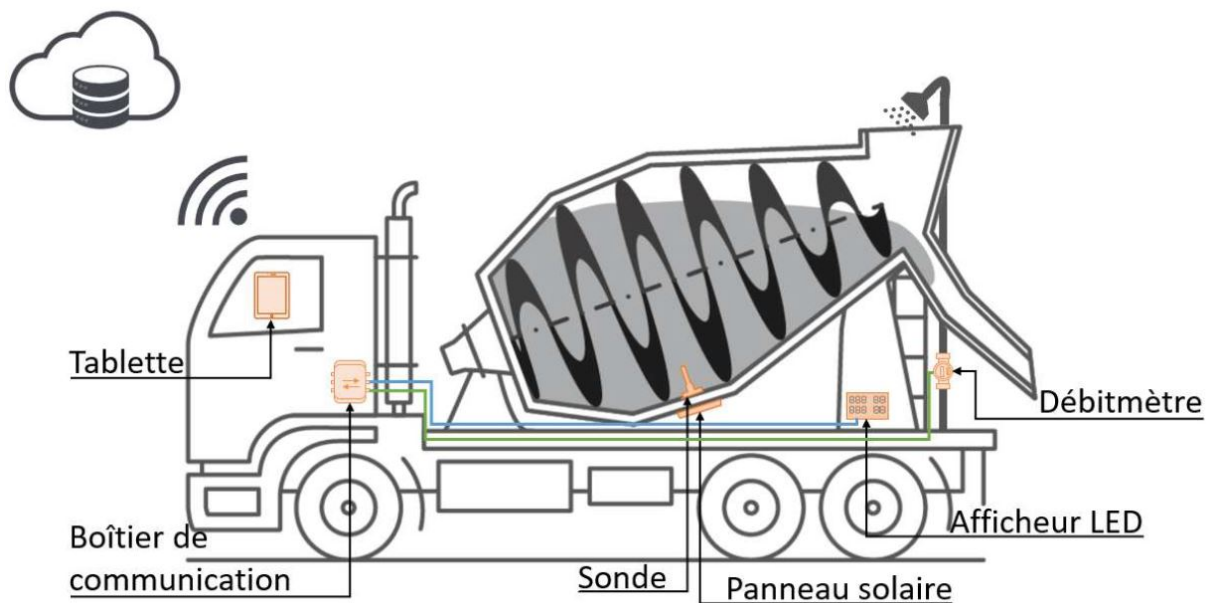


FIGURE 2.14 – Détails du système embarqué pour bétonnière (Siccardi, 2022)

Les mesures prises par le système embarqué sont ensuite stockées dans une base de données en ligne, ce qui permet d'accéder facilement à l'historique de toutes les informations concernant le mélange. Ces données sont accessibles pour les différents intervenants sur un site appelé *TrackIt*, il est possible d'y trouver différentes informations concernant le béton, le

malaxeur et la sonde. Grâce au système de GPS intégré sur les tablettes des chauffeurs, il est également possible de localiser en temps réel les camions durant chaque procédure. Ce site permet, en plus d'accéder aux données, d'afficher un graphique directement ayant comme axe des abscisses le temps et en ordonnée les différentes informations souhaitées. Un exemple du type de graphique que *TrackIt* peut fournir est présenté sur la FIGURE 2.15.

Sur la partie supérieure de ce graphique, trois catégories d'informations peuvent être affichées sur le graphique. La première catégorie reprend l'ensemble des informations concernant le mélange que contient le camion-toupie. Parmi celles-ci, le producteur peut afficher les mesures d'affaissement, de volume, d'ajout d'eau ou encore de température. La catégorie suivante est en lien direct avec la toupie du camion, comme la vitesse de rotation, la direction ou le nombre de tours effectués. La dernière catégorie reprend les informations concernant la sonde intégrée comme la pression mesurée en position basse, le niveau et le fonctionnement des batteries et du panneau solaire.

Les données affichées sur ces graphiques sont en réalité les données brutes ayant subi un traitement pour faciliter l'interprétation par les producteurs de béton. Ces données brutes sont stockées localement sur les tablettes des camions toupies. Cependant, il existe un logiciel de bureau qui permet d'y accéder à distance pour éviter de se déplacer inutilement. En effet, la quantité de données étant importante, devoir se déplacer pour récupérer les données brutes de chaque camion ne serait pas envisageable.



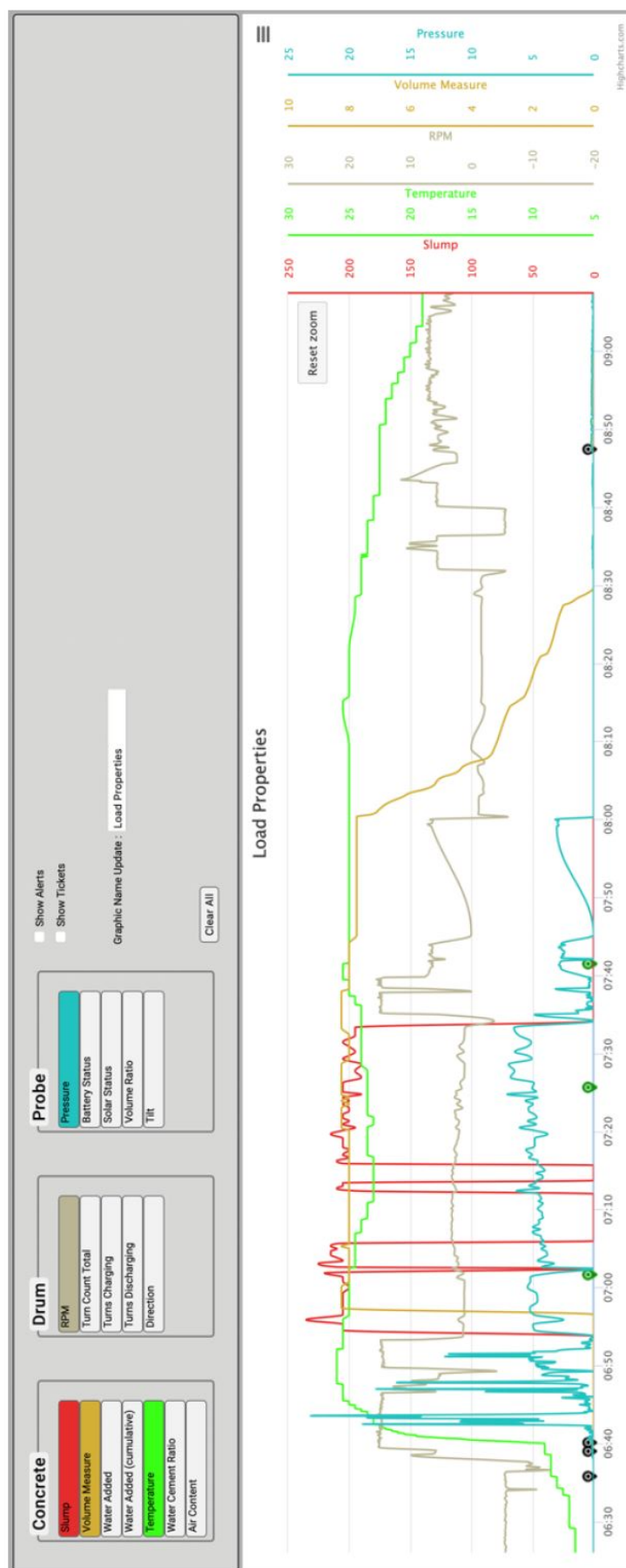


FIGURE 2.15 – Exemple d'informations accessibles avec les graphiques en ligne sur *TrackIt*

En comparant ce système embarqué aux appareils à point unique et à point multiple traditionnels développés dans les sections précédentes, l'utilisation d'un tel système permet d'apporter beaucoup plus de renseignements sur les propriétés des mélanges. Depuis 2016, le système est développé davantage grâce au partenariat entre l'Université Laval et *Command Alkon*. Effectivement, différentes recherches menées par des étudiants (Siccardi, 2022 et Nikolla, 2021) ont permis d'améliorer le système embarqué de *Command Alkon*. Comme précisé précédemment, le principal avantage de ce système réside dans sa capacité à assurer un contrôle qualité continu sur l'intégralité du mélange de béton, sans nécessiter d'intervention humaine, ce qui permet un meilleur contrôle du béton frais. C'est précisément ce constat qui a inspiré les recherches de Hilt (2019), qui soutient qu'une analyse du cycle de vie serait nécessaire pour évaluer les diverses possibilités d'optimisation de l'empreinte environnementale associée à la production de béton prêt à l'emploi. Basé sur l'hypothèse selon laquelle l'utilisation de la sonde permettrait un contrôle qualité plus précis des mélanges de béton, ce qui pourrait éventuellement permettre aux producteurs de béton d'augmenter leur marge de sécurité actuelle, due à l'imprécision des équipements couramment utilisés sur les chantiers, les recherches ont permis de quantifier les avantages environnementaux potentiels de la sonde. Pour cela, Hilt a effectué une analyse simple se basant sur la déclaration environnementale de produit. Les résultats de ses recherches ont indiqué que lorsque les producteurs de béton ont suffisamment confiance dans les équipements utilisés pour le contrôle qualité, ils peuvent réduire la résistance en compression du béton à 28 jours de 40 MPa à 35 MPa, tout en maintenant une résistance en compression spécifiée de 30 MPa. Cette mesure pourrait entraîner une amélioration d'environ 9% de l'impact environnemental pour chaque mètre cube de béton frais. De manière significative, cela pourrait offrir des avantages environnementaux similaires à remplacer 15% du ciment par des cendres volantes.

Il faut dès lors prouver en pratique que l'utilisation de la sonde permet un contrôle qualité supérieur à celui obtenu grâce aux méthodes utilisées traditionnellement sur les chantiers. Cela permettrait d'atteindre les rendements environnementaux cités précédemment et acquies la confiance des producteurs de béton prêt à l'emploi. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de caractériser le plus précisément possible les mélanges. Ce système embarqué permettant de mesurer les paramètres rhéologiques du béton est encore en cours de développement. Par exemple, Berger (2022) a réalisé des recherches sur la rhéologie en comparant des

mesures prises à l'aide d'un rhéomètre IBB aux mesures estimées par la sonde pour un même mélange de béton.

Durant le malaxage, il est également possible de déterminer une valeur d'affaissement en se basant sur la déformation mesurée par les cellules de charges de la sonde. Effectivement, des recherches ont été menées afin de démontrer la précision des valeurs mesurées avec la sonde (Beaupré, 2012). Pour une large gamme de maniabilités, la différence entre les mesures prises avec la sonde et les mesures prises au cône d'Abrams standard était de 10 mm environ. Des essais supplémentaires permettraient probablement d'augmenter la précision des estimations. Il a également été observé que l'erreur est d'autant plus importante que la maniabilité du béton frais est faible. La partie inférieure déformable de la sonde serait visiblement plus adaptée à des bétons plus fluides. Étant donné la vaste gamme d'ouvrabilité à laquelle la toupie d'un camion peut être amenée à faire face, un capteur de déformation précis sur toute la plage de déformation voulue n'est pas évident à concevoir. En effet, lorsque le mélange est très ferme, la prise de mesure devient saturée en se rapprochant de la limite de déformation du capteur. Sur base de cette observation, l'idée est venue d'utiliser en parallèle une deuxième méthode de mesure automatique pour améliorer la précision des mesures d'affaissement.

L'objectif de ma recherche est d'estimer des valeurs d'affaissement pour une large gamme de maniabilités en combinant la sonde *Command Alkon* et le capteur de pression hydraulique installé sur le moteur du malaxeur. Les valeurs d'affaissement mesurées seraient plus précises et plus sûres en se basant sur deux méthodes automatisées.

### **2.3.6 Capteur de pression hydraulique**

Au cours des dernières années, différentes recherches ont été réalisées pour tenter d'estimer l'affaissement du béton frais directement dans les camions toupies. Pour tenir compte de la totalité du mélange et ne pas se baser uniquement sur un échantillon qui ne peut pas être représentatif et qui risque d'induire en erreur les intervenants, il serait intéressant d'implémenter une seconde méthode de mesure automatique qui compléterait la sonde rhéologique de *Command Alkon*. Le principe du capteur de pression hydraulique intégré sur le moteur du malaxeur consiste à considérer un mélange complet de béton en phase de malaxage dans le

camion. Il est logique d'imaginer que, pour une même vitesse de rotation du tambour, l'effort que doit fournir le moteur soit supérieur pour un béton à faible maniabilité (type S1) comparé à un béton plus fluide (type S4). Le moyen de mesurer cet effort est d'installer un capteur de pression hydraulique sur le conduit d'entrée d'huile du moteur hydraulique qui permet de mettre en rotation la toupie comme représenté sur la FIGURE 2.16.



FIGURE 2.16 – Emplacement du moteur hydraulique sur les camions malaxeurs (Nikolla, 2021)

Depuis les années 1990, des travaux de recherches ont été réalisés sur ce concept de capteur de pression hydraulique embarqué sur un moteur hydraulique. Des études ont pu mettre en évidence des corrélations entre les pressions mesurées sur le moteur hydraulique et les essais d'affaissement au cône d'Abrams pour différents volumes de chargement (Assh, 1998). Cependant, à ce moment-là, les méthodes pour mesurer le volume de béton contenu dans le camion et la vitesse de rotation de la toupie n'étaient pas très développées. Cela engendrait une grande imprécision dans les mesures et une incertitude significative. En ce qui concerne le volume de béton, il était calculé en additionnant la quantité de chacun des ingrédients lors du chargement à l'usine de production. Et pour la vitesse de rotation de la toupie, des marqueurs étaient installés sur la partie extérieure du malaxeur afin de noter le nombre de tours effectués dans un intervalle de temps prédéfini : ceci permettait de calculer les rotations par

minute (RPM).

Plus d'une dizaine d'années plus tard, les avancées technologiques ont donné lieu au développement de systèmes plus précis pour les camions malaxeurs, utilisant le même principe de mesure. Un exemple notable est VERIFI<sup>®</sup>, un système embarqué largement utilisé dans l'industrie, qui utilise un capteur de pression installé sur le moteur hydraulique pour estimer l'affaissement du béton. Pour cela, un autre capteur est placé à l'extérieur du malaxeur pour mesurer la vitesse de rotation de la toupie. L'algorithme prend en compte quatre variables principales : la vitesse de rotation du malaxeur, la pression hydraulique, le volume du béton et la formulation spécifique du béton. De plus, en utilisant un autre capteur et des débitmètres, ce système permet également de mesurer la température du mélange ainsi que l'ajout d'eau et d'adjuvants.

Suite à l'utilisation de ce système sur 20 gâchées et 6 formulations différentes de mélange, des recherches ont permis de conclure que ce système pouvait mesurer adéquatement l'affaissement et la température du béton dans le camion (Khayat & Libre, 2014). Il était également possible d'ajuster automatiquement la quantité d'eau et d'adjuvant dans le mélange pour maintenir celles-ci aux valeurs souhaitées jusqu'à la livraison sur chantier. La moyenne et l'écart-type de la différence entre l'affaissement du béton au moment de la livraison et l'affaissement ciblé étaient respectivement de 17 mm et 11 mm (Khayat & Libre, 2014). De plus, il a été observé qu'une quantité totale d'eau moindre était utilisée en ajustant progressivement l'eau tout au long du transport, plutôt qu'en une seule fois sur le chantier. Il est également à noter que les résistances à la compression étaient égales, voire supérieures, à celles obtenues lorsque toute l'eau était ajoutée en une seule fois sur le chantier.

Le dernier travail de recherche réalisé par Nikolla en 2021 consistait à implémenter un capteur de pression hydraulique en complément du système embarqué *Command Alkon*. Le projet a été mené en 3 phases principales afin de récolter des données dans des situations différentes. Ces données ont permis de trouver deux équations différentes pour prédire l'affaissement du béton en fonction de la pression hydraulique mesurée par le capteur (FIGURE 2.17). De plus, différents facteurs ont été analysés comme le volume de chargement, l'ajout d'eau, de superplastifiant ou encore la vitesse de rotation du malaxeur. Les résultats présentés

sont très prometteurs comme pour la sonde de chez *Command Alkon*.

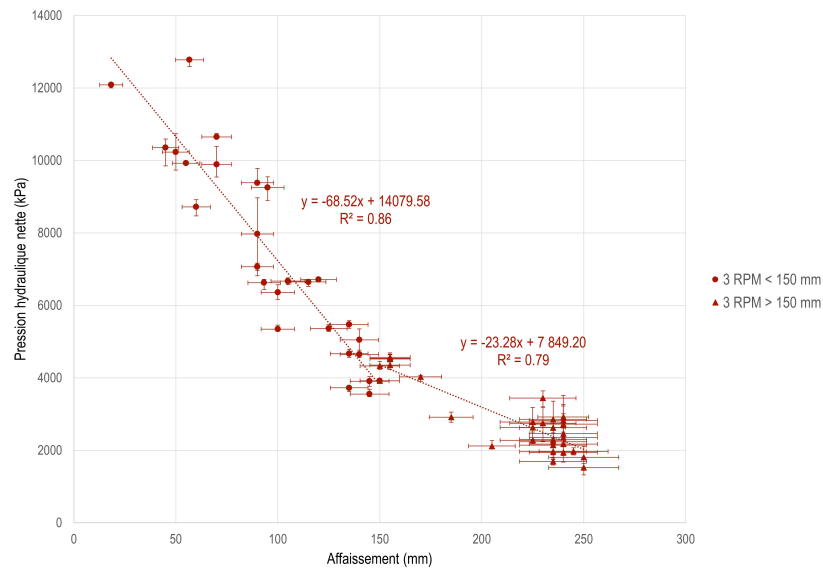


FIGURE 2.17 – Équations déterminées pour prédire l’affaissement du béton frais à basse vitesse en fonction de la pression hydraulique nette (Nikolla, 2021)

Améliorer cette deuxième méthode de mesure ayant déjà fait ses preuves en utilisant la pression hydraulique du moteur du camion et tirer les avantages du système embarqué de *Command Alkon* serait intéressant pour rendre l’estimation de l’affaissement plus précise.

## 2.4 Conclusion

Cela fait plusieurs décennies que les essais à point unique sont reconnus beaucoup moins précis pour caractériser les bétons modernes, car ils ne sont basés que sur un seul paramètre. C'est pour cela que la sonde *Command Alkon* est développée depuis quelques années. Cette sonde permet une caractérisation continue sur l'ensemble du chargement du camion. À l'opposé, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams n'est réalisé que sur un seul échantillon et une seule fois avant le déchargement. Bien qu'à l'heure actuelle ce soit l'essai le plus utilisé en pratique pour des raisons de coût et de gain de temps, il présente quelques limitations. Afin de répondre à la demande de l'industrie, il est important de développer des nouvelles méthodes plus précises et avantageuses pour mesurer l'affaissement en continu du béton frais durant le transport.

La sonde permet d'estimer l'affaissement du béton frais de manière précise en se basant sur la déformation engendrée par la force de trainée dans le béton. Le système mis en place par *Command Alkon* permet de suivre en continu l'ouvrabilité du béton pour l'ensemble du mélange. Le manque de précision pour les mélanges plus fermes rend intéressant l'intégration d'une deuxième méthode de mesure automatisée. Ce travail de recherche consiste donc à utiliser, en plus du système embarqué *Command Alkon*, la pression du moteur hydraulique du camion afin d'estimer l'affaissement en continu pour une large gamme de maniabilités et pour une large gamme de vitesses de rotations du malaxeur. L'utilisation des deux capteurs devrait permettre de renforcer la fiabilité de la valeur d'affaissement calculée. Une amélioration de la confiance dans la mesure à l'aide de capteurs intégrés permettrait à terme de ne plus devoir effectuer un essai d'affaissement au cône d'Abrams sur chantier lors de la livraison.

# Chapitre 3

## Méthodologie

### 3.1 Introduction

Comme expliqué précédemment, dans l'état de l'art, les méthodes actuelles pour mesurer l'affaissement du béton frais ont quelques faiblesses. Pour améliorer et développer le secteur de la construction, il serait davantage intéressant d'améliorer le système embarqué mis en place par *Command Alkon*. Ainsi, les propriétés du béton frais pourraient être mesurées à partir du chargement du camion-toupie jusqu'à son déchargement complet. Ce système embarqué permet déjà de mesurer avec une assez bonne précision la valeur d'affaissement grâce à la sonde embarquée dans le malaxeur. Or, la norme CSA impose que cette mesure soit encore plus précise en comparaison à la mesure effectuée avec le cône d'Abrams, appareil de mesure qui sert actuellement de référence dans l'industrie du béton prêt à l'emploi. Pour que ce système embarqué soit un jour reconnu par la norme, il est nécessaire de continuer le développement et la recherche afin de renforcer la fiabilité des mesures de l'affaissement.

La méthodologie qui est développée dans ce chapitre a été en grande partie mise en place par Nikolla D. lors de son projet de recherche. En effet, les équipements utilisés et les méthodes d'acquisition des données sont les mêmes pour ce travail de recherche. La majorité des données utilisées dans le cadre de ce travail proviennent des trois campagnes de récoltes de données menées par Nikolla. L'objectif étant d'ajouter une deuxième méthode de mesure de l'affaissement pour renforcer la confiance dans le système embarqué de *Command Alkon*, en essayant également de combiner ces deux capteurs.



### 3.1.1 Données récoltées par Nikolla D.

Comme expliqué au point précédent, Nikolla a effectué trois campagnes d'essais différentes pour récolter des données et permettre le développement du capteur de pression hydraulique. Les premiers essais ont été réalisés sur le camion de l'Université dans l'usine de production de *Béton 2000* à Québec. Ce camion a permis dans un premier temps de calibrer le système et de valider le bon fonctionnement du capteur installé additionnellement au système embarqué de chez *Command Alkon*. Le camion a une capacité de 8 m<sup>3</sup> et est semblable à la majorité des camions servant à la production de béton. Différents mélanges et différents paramètres ont pu être analysés durant cette première campagne étant donné que la composition et la quantité de béton utilisé pour chaque mélange pouvaient être choisies par l'expérimentateur.

Tous les capteurs sont reliés au boîtier d'acquisition qui transmet ensuite les données à la tablette du chauffeur. Ces données brutes sont disponibles sous forme de fichier texte XML sur la tablette. Ces fichiers doivent être traités avec un code *Python* pour en ressortir les informations nécessaires à l'analyse des données. Ce code *Python* sera expliqué plus tard dans ce chapitre.

Ensuite, la seconde campagne d'essai se déroulait chez *Béton Provincial* à Québec. Cette fois-ci, le capteur a été ajouté au système embarqué *Command Alkon* sur un camion qui servait à la production. Les propriétés du mélange ne pouvaient plus être choisies, mais dépendaient directement des différentes commandes de béton durant la journée de livraison du chauffeur. Il était indispensable d'être à bord du camion pour récupérer les données stockées sur la tablette du chauffeur, car le stockage de cette tablette est réinitialisé chaque jour. Le volume du camion est identique au camion de l'Université Laval (8 m<sup>3</sup>).

Finalement, les dernières données récoltées proviennent de chez *Béton Provincial* à Drummondville. Les camions sur lesquels le capteur a été intégré sont également des camions de production. L'avantage du site de Drummondville est qu'il est situé juste à côté d'une usine de préfabrication d'éléments en béton. En effet, le nombre de données récoltées sur une journée est important étant donné la courte distance séparant les deux usines. Il est à noter que les mélanges utilisés dans cette usine de préfabrication sont très fluides pour faciliter la mise

en place. Les camions utilisés pour cette campagne d'essai ont un volume de chargement de  $12,5 \text{ m}^3$  à la différence des camions précédemment utilisés ayant un volume de  $8 \text{ m}^3$ . Cette différence qui peut paraître anecdotique sera le sujet de discussions dans le chapitre suivant.

### 3.1.2 Données 2024

Dans le cadre de ce travail de recherche, une nouvelle campagne de récolte de données assez courte a été mise en place. Le nouveau capteur a été installé sur un camion de *Béton Provincial* à Québec pour récolter ces données. Le camion utilisé est un camion en production avec un volume de  $8 \text{ m}^3$  comme la majorité des camions utilisés lors des précédentes campagnes d'essais. Il était également indispensable d'être à bord du camion pour récolter les données provenant de la tablette. Ainsi, il était possible d'effectuer une mesure au cône d'Abrams de l'affaissement pour chacune des livraisons de béton frais. Étant donné les délais d'installations du capteur et la durée du stage de recherche, seulement quelques données ont pu être récoltées et traitées.

## 3.2 Équipements utilisés

La partie suivante détaille les différents équipements utilisés dans le cadre de cette recherche ainsi que lors de la recherche de Nikolla.

### 3.2.1 Types de camions

Pour récolter l'ensemble des données utilisées, deux types de camions ont été utilisés. Les camions utilisés sont de marque *London*. Le camion malaxeur de  $8 \text{ m}^3$  est le camion le plus répandu dans l'industrie du béton prêt à l'emploi et c'est celui-là qui a été utilisé majoritairement. Une photo de ce camion est visible sur la FIGURE 3.1. Chez *Béton Provincial* à Drummondville, les camions avaient une capacité de  $12,5 \text{ m}^3$  et il s'agissait de camion semi-remorque contrairement aux autres camions de  $8 \text{ m}^3$ .



FIGURE 3.1 – Camion malaxeur de 8 m<sup>3</sup> de Béton Provincial (456)

### 3.2.2 Cône d'Abrams

L'appareil utilisé pour mesurer la valeur d'affaissement manuellement est un cône d'Abrams avec un bourroir métallique. Ce bourroir en acier a un bout rond de 16 mm de diamètre pour répondre aux exigences de l'Association Canadienne de Normalisation. Les dimensions du cône sont également normalisées et ces équipements sont visibles sur la FIGURE 3.2.



FIGURE 3.2 – Cône d'Abrams avec bourroir à pointe arrondie

### 3.2.3 Sonde

La sonde en acier inoxydable de *Command Alkon* permet de récolter des mesures sur le béton frais et est l'élément central de leur système embarqué. Avec une longueur de 28 cm et un diamètre de 4,3 cm, l'intérieur de sa coquille renferme les 3 accéléromètres, le thermistor ainsi que les cellules de charges placées sur sa partie déformable. La FIGURE 3.3 est une photo d'une des sondes utilisées lors de ce travail de recherche. Plus d'informations concernant la sonde sont disponibles dans le brevet déposé en 2019 (Beaupré et al., 2019).



FIGURE 3.3 – Sonde de *Command Alkon*

### 3.2.4 Capteur de pression hydraulique

Durant les trois premières campagnes d'essais, le capteur utilisé était différent de celui utilisé actuellement. Le principe de fonctionnement est identique pour les deux modèles et ils sont composés d'un capteur en silicone de haute précision protégé par un diaphragme en acier inoxydable rempli d'huile. En combinant les effets de la linéarité, l'hystérésis et la répétabilité, ce type de capteur atteint une précision de  $\pm 0,25 \%$ . Cette valeur de précision provient du fabricant qui se base sur des données extraites de l'étalonnage pour plusieurs valeurs de pressions connues. En faisant une régression linéaire avec ces différents points, il est possible de mesurer l'écart entre les valeurs provenant de l'étalonnage et la droite approximée. Ce niveau de précision est largement suffisant en regard des variations de pressions importantes qui peuvent provenir du moteur hydraulique lors du malaxage. Un autre point important concernant l'utilisation de ces capteurs est simplement le fait que leurs plages de température pour lesquelles ils sont opérationnels se situe entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $85^{\circ}\text{C}$ . Point non négligeable vu les condi-

tions météorologiques canadiennes.

La principale différence entre les deux modèles de capteur est la plage de courant continu qu'il y a en sortie. En effet, le premier capteur utilisé avait une sortie entre 0 et 5 volts contre 10 volts pour le nouveau. Cette augmentation de voltage va doubler la précision des valeurs de pressions mesurées. Tous les deux de la marque *Omega*, le premier capteur est le *PX309-3KG5V* et le nouveau capteur est le *PX359-3KG10V*. En observant la FIGURE 3.4, les deux capteurs ne sont pas munis de la même connectique. D'un point de vue pratique, lorsque le câble du premier capteur est sectionné, il faut remplacer l'ensemble du capteur. Contrairement au nouveau capteur qui est muni d'une connectique M12 pour remplacer le câble plus facilement lorsqu'il est sectionné. La capacité maximale des capteurs est de 3000 PSI, ce qui correspond à environ 20 700 kPa.

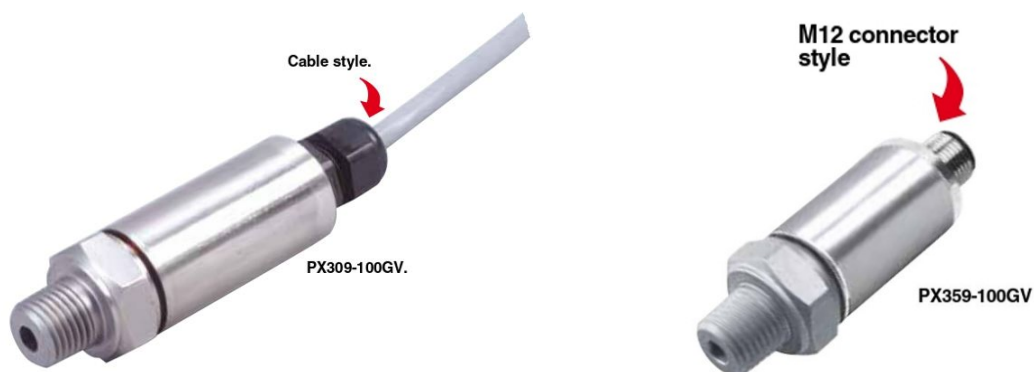


FIGURE 3.4 – Capteurs de pression hydraulique *Omega*

L'utilisation de tels équipements de précision sur des camions travaillant dans des environnements de chantier, peut s'avérer risqué pour les capteurs. Pour éviter de les dégrader, des boîtiers de protections recouvrant les capteurs ont été imprimés en 3D. Ces boîtiers sont visibles sur la FIGURE 3.5. Un amortisseur a également été installé pour réduire les variations brusques de pressions pouvant aller jusqu'à 70 000 kPa. Cet amortisseur de pression est le modèle *PS-4D* d'*Omega*. Les fiches techniques des différents capteurs utilisés et de l'amortisseur se trouvent dans les Annexes à la fin de ce rapport.

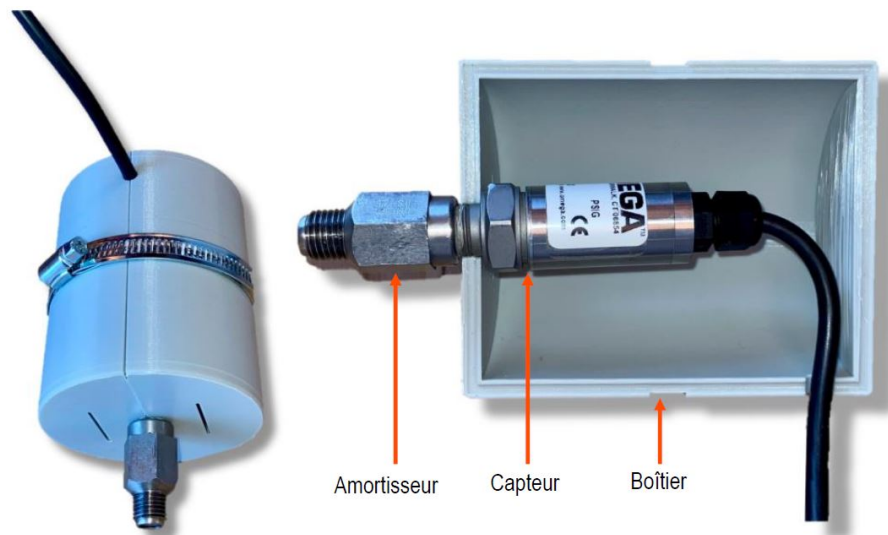


FIGURE 3.5 – Capteur de pression hydraulique dans le boîtier de protection avec l’amortisseur (Nikolla, 2021)

### 3.3 Phases de préparations

Afin de récolter des données et que celles-ci soient utilisables, certaines étapes de préparations sont nécessaires. Une fois ces étapes mises en place, les données peuvent être récoltées et servir ensuite à développer un modèle de prédiction de l’affaissement du béton frais contenu dans la toupie du camion.

#### 3.3.1 Calibration du capteur à l’aide de la pompe hydraulique manuelle

Avant même d’installer un capteur de pression hydraulique sur le moteur hydraulique du malaxeur, il faut effectuer une calibration manuelle pour s’assurer que la calibration théorique est correcte. En effet, les données brutes fournies par le capteur ne sont pas en unités de pression bien connue, mais en volts. Une calibration permettra d’obtenir une relation pour convertir le signal électrique en unité de pression utilisée couramment. Pour cela, un vérin manuel de la marque *Simplex* a été utilisé. Sa capacité maximale est de 70000 kPa, ce qui est amplement suffisant comparé à la plage de réponse du capteur d’*Omega*. La FIGURE 3.6 est une photo de la pompe hydraulique utilisée dans le laboratoire pour la calibration.



FIGURE 3.6 – Pompe hydraulique manuelle (capacité : 700 bars)

Lors de cette calibration, le capteur était connecté au vérin et au boîtier de communication *Command Alkon*. Ce boîtier communique avec une tablette sur laquelle le signal mesuré par le capteur est retranscrit en volts. Étant donné que la pompe hydraulique est équipée d'un manomètre, c'est possible de corréler la pression hydraulique mesurée par celui-ci avec le signal électrique envoyé sur la tablette. En effectuant plusieurs mesures à différentes pressions entre 0 et 3000 PSI, le graphique repris sur la FIGURE 3.7 permet de définir une équation qui met en relation la pression hydraulique en fonction du signal électrique (volts). Cette équation sera utilisée plus tard dans le code *Python* pour convertir les données brutes en données de pressions.

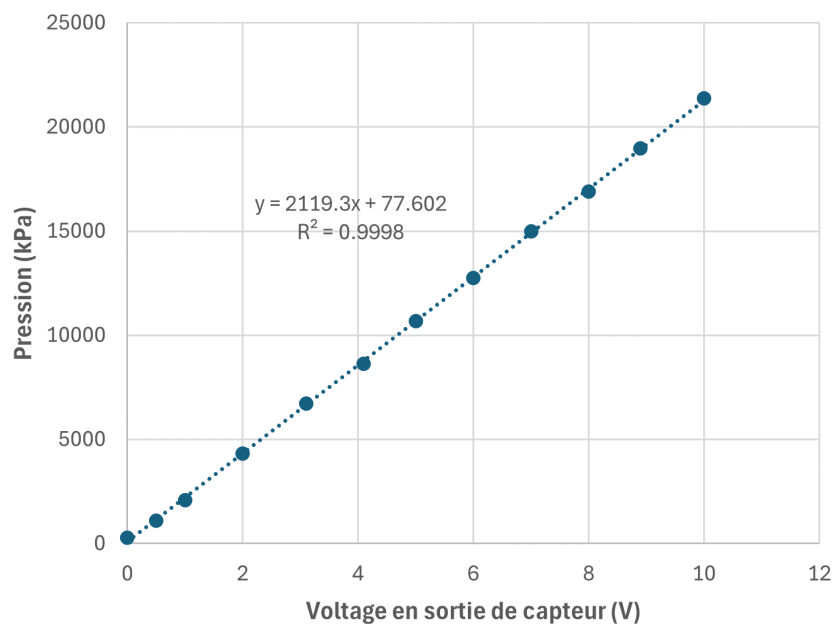


FIGURE 3.7 – Graphique de calibration pour le capteur PX359-3KG10V



### 3.3.2 Montage expérimental

Une fois la calibration du capteur effectué, celui-ci peut-être installé sur le camion. Le capteur est placé à proximité du moteur hydraulique, sur le tuyau apportant l'huile au moteur. Ensuite, le branchement électrique du capteur sur le boîtier de communication *Command Alkon* peut-être effectué. La FIGURE 3.8 représente l'emplacement du capteur sur le moteur hydraulique.

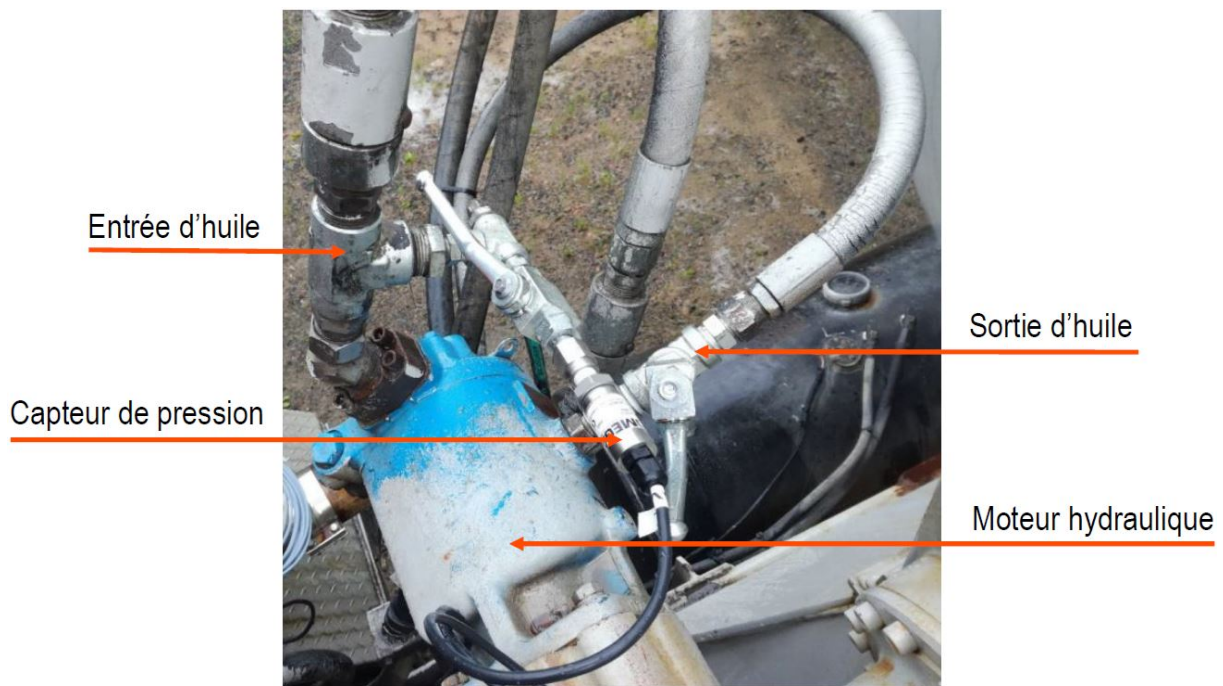


FIGURE 3.8 – Installation d'un capteur de pression sur le moteur hydraulique d'un camion malaxeur (Nikolla, 2021)

Sur la FIGURE 3.9, l'ensemble du système *Command Alkon* est schématisé. Le capteur de pression hydraulique a été installé sur le moteur hydraulique du camion à proximité de la cabine du chauffeur.



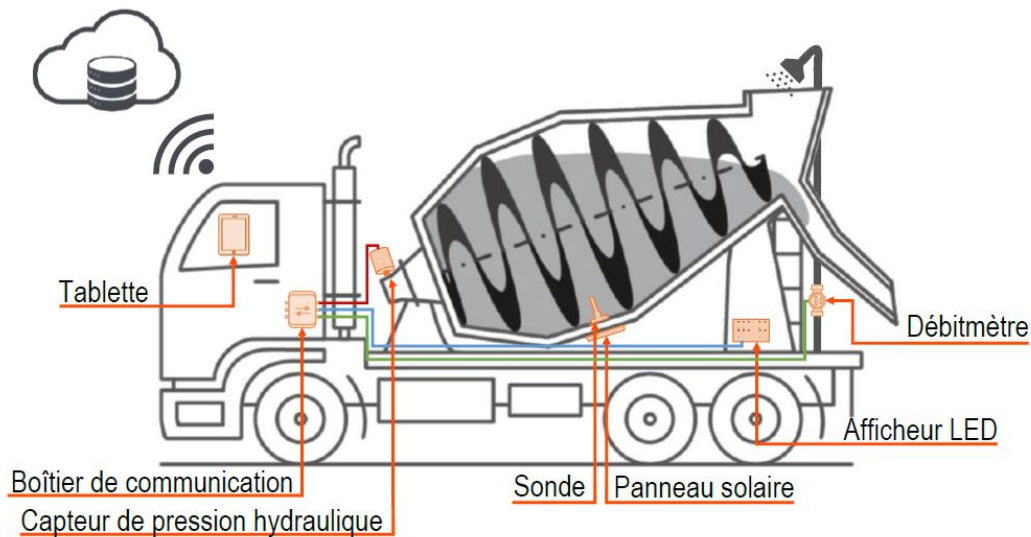


FIGURE 3.9 – Système embarqué sur un camion malaxeur (Nikolla, 2021)

Cette proximité avec la cabine permet de connecter facilement le nouveau capteur au boîtier de communication qui se trouve dans la cabine du chauffeur. Ce boîtier permet d'enregistrer les données prises par le capteur de pression hydraulique et de centraliser l'ensemble des mesures générées par les différents capteurs mis en place sur le camion. La sonde est également reliée au boîtier de communication, qui est lui-même relié aux afficheurs LED et à la tablette par Bluetooth. Cela permet d'avoir l'ensemble des données synchronisées et ainsi faciliter le post-traitement. Notons également que les données enregistrées pour la sonde sont des valeurs d'affaissement contrairement aux valeurs du capteur de pression hydraulique qui sont des données brutes en volts.

### 3.3.3 Traitement des données brutes

Étant donné la quantité importante de données de pressions brutes qui est récoltée durant une journée d'essai, Nikolla a développé un code *Python* permettant de les traiter plus simplement. Ce code permet notamment de mettre ces données sous forme de graphique avec la pression brute en ordonnée et le temps en abscisse (FIGURE 3.10).

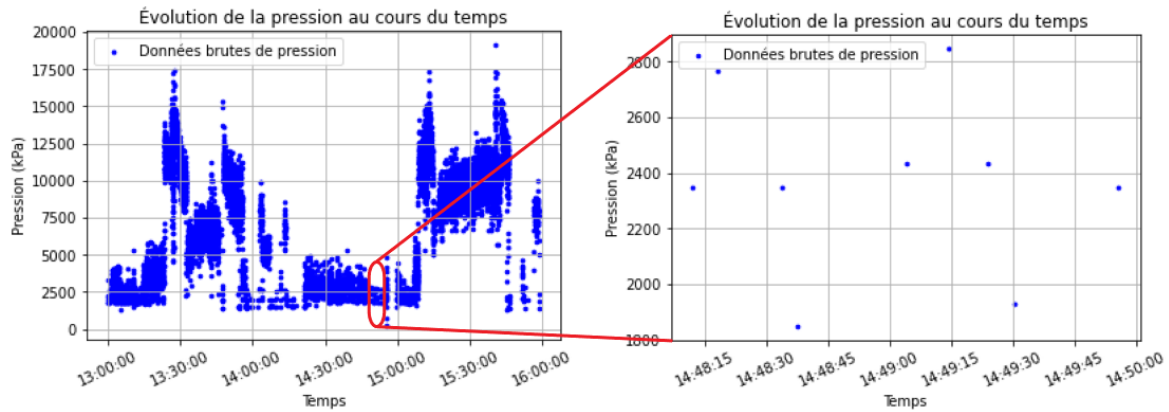


FIGURE 3.10 – Exemple de données brutes analysées avec le code *Python*

Le moteur hydraulique du camion fonctionne à pression cyclique, cela engendre des pressions qui suivent une certaine courbe sinusoïdale. L'amplitude de cette courbe est d'autant plus grande que la vitesse de rotation de la toupie est élevée. Il paraissait non concevable de travailler avec de telles données de pressions, pour cela, il a fallu trouver une façon de les traiter pour obtenir plus facilement la pression mesurée à un moment précis. En faisant une moyenne mobile des pressions brutes, le code *Python* permet d'obtenir une seconde courbe avec des pressions plus stables. Le principe de la moyenne mobile est simple, chacun des points est remplacé par la moyenne des points qui l'entourent. Les résultats de ce filtre appliqué aux données brutes sont visibles sur la FIGURE 3.11. Les nouvelles valeurs sont superposées aux valeurs de pression brutes.

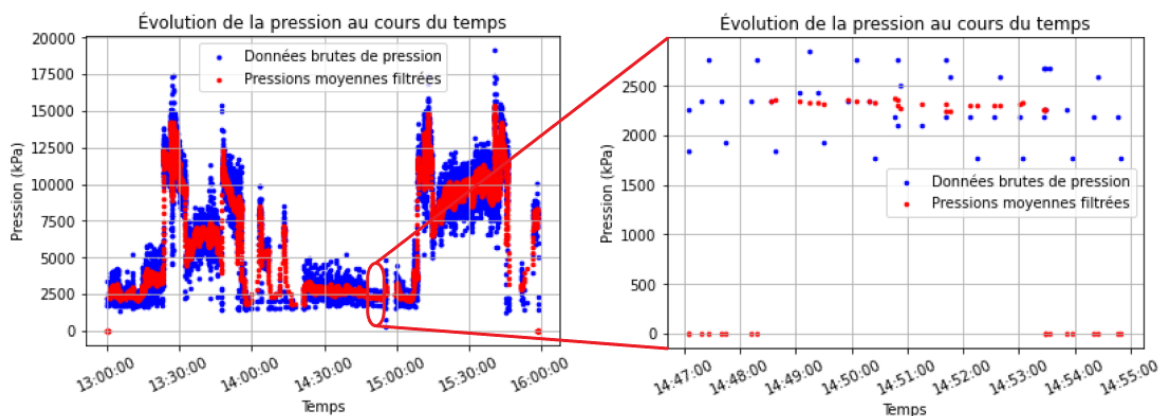


FIGURE 3.11 – Exemple de données filtrées obtenues en utilisant une moyenne mobile avec le code *Python*

Chaque point rouge sur le graphique représente la moyenne des 25 points bleus précédents et des 25 points bleus suivants. Ce choix de nombre de points vise à assurer une courbe relativement stable lorsque la toupie malaxe à haute vitesse. À basse vitesse, la courbe sinusoïdale a une amplitude plus petite, ce qui réduit le nombre de points à 8 pour assurer une bonne stabilité de la courbe. Ainsi, en faisant la moyenne d'une section stable de la courbe rouge, il est possible d'obtenir précisément la pression moyenne du moteur hydraulique pendant un certain laps de temps. Les essais préliminaires effectués avec le camion de l'Université Laval chez Béton 2000 ont démontré qu'une vitesse de rotation constante de la toupie, couplée à l'enregistrement des données de pression pendant au moins une minute durant le malaxage du béton, était nécessaire pour obtenir des courbes stables à la fois à haute et basse vitesse. Il est alors possible d'obtenir une valeur de pression moyenne à un moment précis pour lequel une valeur d'affaissement manuel au cône d'Abrams est connue.

Durant ce travail, le format du fichier récolté à l'aide du capteur n'est plus le même que lors du travail de Nikolla. Le code *Python* développé en 2021 n'est donc plus vraiment utilisable pour les nouveaux fichiers récoltés. En effet, le nouveau type de fichier (*json*) peut-être importé sous forme de tableau dans *Excel*. Le principe de la moyenne mobile est appliqué de la même manière que dans le code *Python* et les résultats de ce traitement sont visibles sur la FIGURE 3.12. Notons que l'index sur l'axe des abscisses correspond à un pas de temps d'environ 5 secondes. Ce pas de temps signifie que toutes les données des différents capteurs sont enregistrées toutes les 5 secondes sur un fichier. Ensuite, l'ensemble des fichiers sont combinés et stockés en ligne sur *TrackIt*. Une fois ce fichier enregistré en ligne, il est possible de le récupérer pour entamer le traitement des données. Les données brutes traitées avec *Excel* sont semblables aux données brutes traitées avec *Python*. Vu le peu de temps disponible pour traiter les nouvelles données, l'implémentation d'un nouveau code *Python* aurait pris trop de temps, bien qu'une automatisation du traitement aurait permis un gain de temps à long terme.

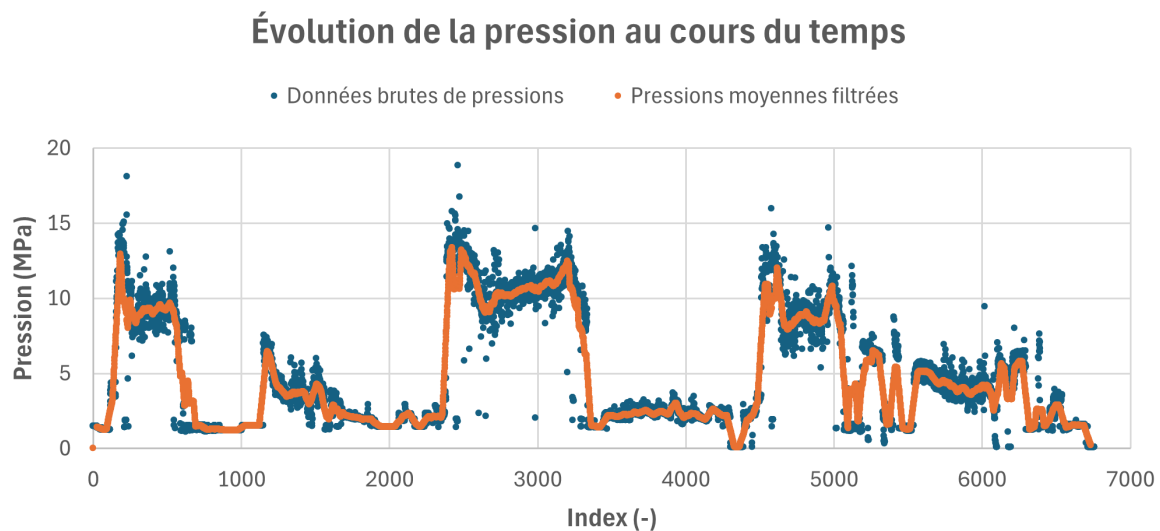


FIGURE 3.12 – Exemple de données filtrées avec Excel durant 1 journée

En plus des données de pression brutes en fonction du temps, il est nécessaire de connaître la vitesse de rotation de la toupie pour savoir si le malaxage est à basse ou à haute vitesse. Comme expliqué précédemment, la sonde permet d'enregistrer les RPMs de la toupie grâce aux accéléromètres. Cette information est également stockée en ligne sur le fichier. Il est alors possible de tracer l'évolution de cette vitesse de rotation en fonction du même index que pour la pression brute (FIGURE 3.13).

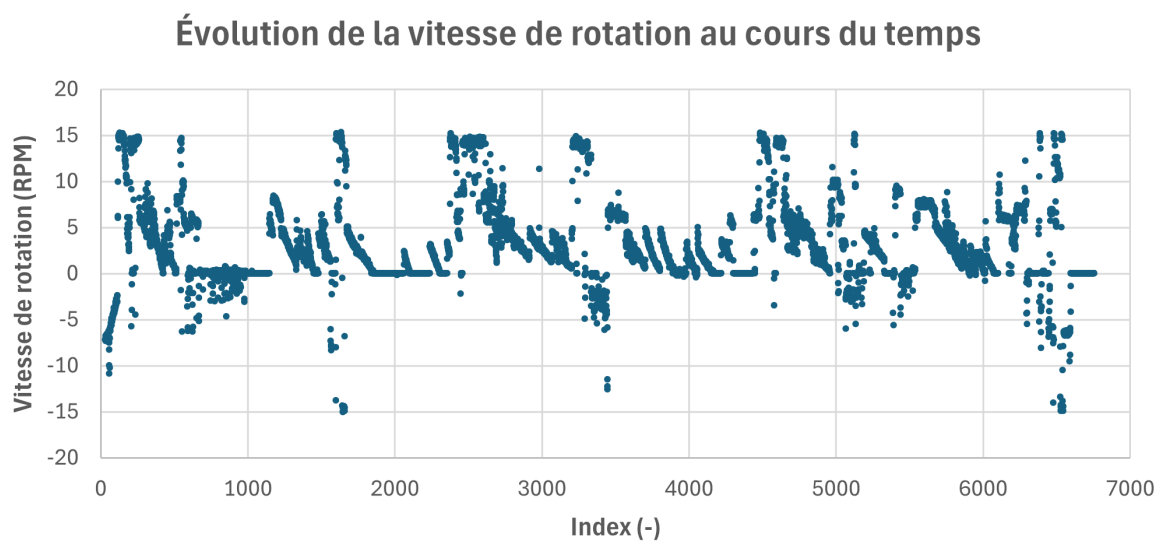


FIGURE 3.13 – Évolution de la vitesse de rotation durant 1 journée

### 3.3.4 Pression nette

Pour pouvoir comparer les valeurs de pression hydraulique provenant de différentes bétonnières utilisées durant toutes les phases de collecte de données, des mesures de pression hydraulique ont été effectuées à différentes vitesses de rotation, avec la toupie complètement vide, pour chaque camion utilisé. La FIGURE 3.14 correspond aux mesures prises sur le camion de *Béton Provincial* à Québec lorsqu'il était vide.

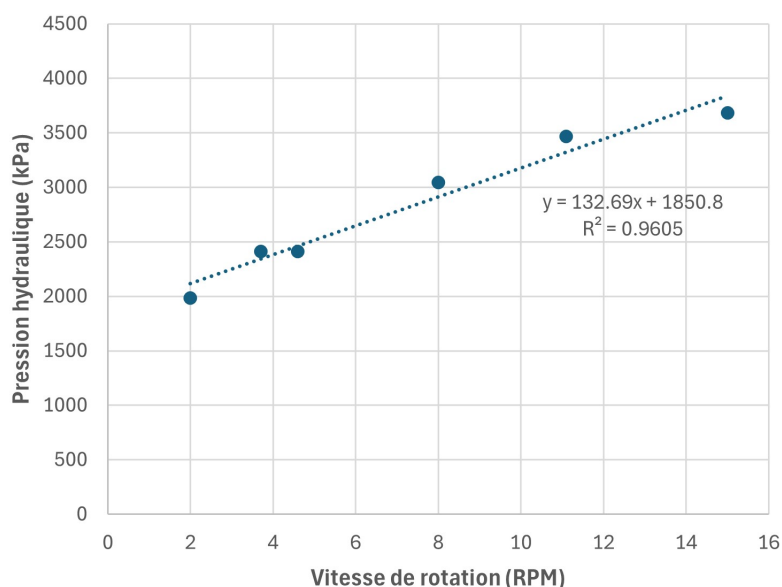


FIGURE 3.14 – Pression hydraulique en fonction de la vitesse de rotation de la toupie à vide du camion de production de *Béton Provincial* à Québec (456)

Ce graphique illustre que ces données suivent une régression linéaire, avec un coefficient de détermination de 0,96, indiquant une corrélation très forte. Grâce à l'équation obtenue par cette régression linéaire, il est possible de calculer précisément et de soustraire la pression du moteur hydraulique lorsque le camion est vide des mesures de pression prises lorsque le camion est chargé, en tenant compte de la vitesse de rotation de la toupie au moment de la mesure. Cela permet d'obtenir la "pression nette" nécessaire pour faire tourner la toupie à une certaine vitesse avec différents mélanges, tout en réduisant l'impact de l'usure et des caractéristiques spécifiques de conception des pièces mécaniques de chaque camion sur la pression hydraulique. Cette approche vise également à obtenir une comparaison plus précise entre les données provenant de différents modèles de moteurs hydrauliques équipant les bétonnières. Par exemple, si un modèle nécessite des pressions plus élevées qu'un autre pour faire tourner la toupie à vide, cet écart n'est pas pris en compte. Les équations de chacun des camions

utilisés lors des récoltes de données sont reprises dans la TABLE 3.1.

Numéro du camion	Équation
1085 (B2000)	$y = 138,47 x + 3036,8$
402 (BP QC)	$y = 160,36 x + 2579,9$
354 (BP DR)	$y = 181,43 x + 2052,8$
355 (BP DR)	$y = 168,24 x + 2361,2$
456 (BP QC)	$y = 132,69 x + 1850,8$

TABLE 3.1 – Équations des pressions hydrauliques à vide pour chacun des camions

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en avant l'ensemble des outils utilisés dans le travail de Nikolla et dans ce travail. Tant manuel qu'informatique, ces outils permettent de récupérer les données et ensuite de les traiter pour en faciliter l'analyse. Le code *Python* et son fonctionnement sont détaillés, bien qu'actuellement les données soient traitées sur *Excel*. Ce traitement des données est le point de départ de l'analyse des données récoltées sur site. L'ensemble des résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant.

# Chapitre 4

## Résultats et discussions

### 4.1 Introduction

Ce chapitre consiste à mettre en avant les différents résultats obtenus grâce à l'ensemble des données récoltées lors de toutes les campagnes de mesures. Les méthodes de traitements et la manière de récupérer ces données ont été traitées dans les chapitres précédents. Nous pouvons désormais analyser et combiner les différentes méthodes de mesures pour mieux prédire la valeur d'affaissement du béton frais lors du transport de l'usine de production jusqu'au chantier.

### 4.2 Résultats

Avant de vouloir développer un modèle de prédiction de l'affaissement du béton frais, il est important de vérifier la pertinence des données utilisées pour les analyses. En effet, les données récoltées n'ont pas été enregistrées toutes dans les mêmes conditions. Différents paramètres sont à surveiller et ceux-ci vont permettre de trier les données dans plusieurs cas. Parmi ces paramètres, la vitesse de rotation de la toupie du camion va influencer la valeur de pression hydraulique mesurée par le capteur, il est donc important de distinguer deux cas de figures principaux ; la basse vitesse et la haute vitesse qui ont comme vitesse de rotation respectivement 3 et 14 RPM. Ces deux cas seront bien traités distinctement pendant l'analyse des données. Le paramètre suivant qui devra être considéré est le volume total du camion. Effectivement, bien que la majorité des camions utilisés aient une capacité de  $8 \text{ m}^3$ , certaines données

ont été récoltées sur des camions de 12,5 m<sup>3</sup>. Toujours en ce qui concerne le volume de remplissage du camion, le niveau de remplissage va influencer la pression hydraulique mesurée. Il est donc important de vérifier à partir de quel pourcentage de remplissage du camion la pression hydraulique n'est plus influencée par le niveau de remplissage. Le dernier paramètre pouvant influencer l'analyse des données réside dans le fait que 3 années séparent les premières campagnes d'essais et la dernière campagne d'essai menée lors de ce travail. En effet, les capteurs utilisés et les méthodes n'étant plus exactement les mêmes, il est nécessaire de s'assurer que les données provenant de ces différentes campagnes soient bien comparables.

#### 4.2.1 Influence de la capacité du camion

Comme expliqué précédemment, les camions utilisés durant les campagnes d'essais n'ont pas tous la même capacité. En effet, la majorité des camions ont une toupie de 8 m<sup>3</sup> et quelques autres camions ont un volume de 12,5 m<sup>3</sup>. Notons également que les camions de 12,5 m<sup>3</sup> ont été utilisés pendant la campagne d'essai à Drummondville pour les mélanges essentiellement très fluides. Cette usine étant située à proximité d'une usine de béton préfabriqué, le béton frais utilisé pour ce type d'application doit être relativement fluide pour faciliter la mise en place.

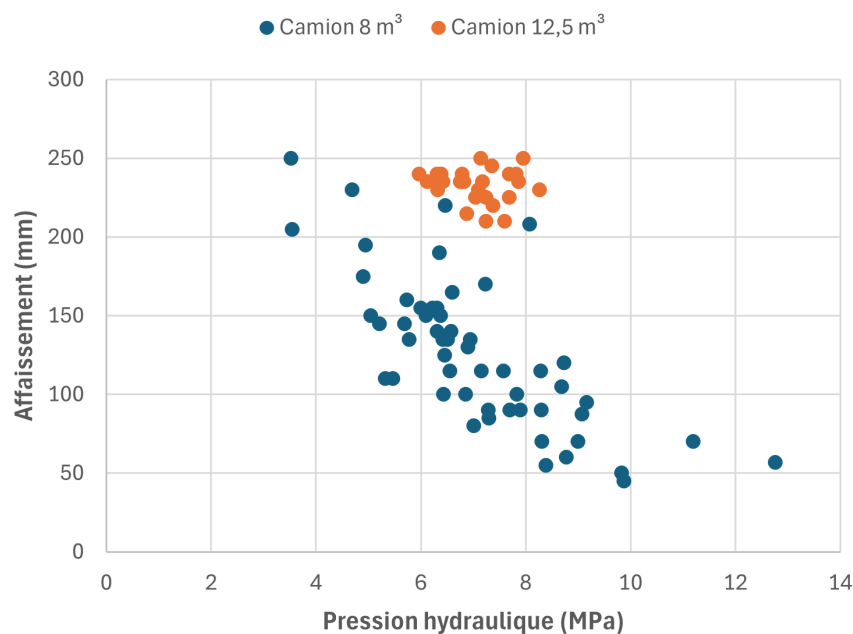


FIGURE 4.1 – Mesures de pression hydraulique nette à haute vitesse de rotation en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams

En regardant toutes les données sur un graphique reliant la pression hydraulique et l'af-



faissement du béton frais (FIGURE 4.1), il est possible de distinguer assez facilement les deux types de camions utilisés. En effet, les données récoltées à Drummondville forment un groupe de points entre 200 et 250 mm qui semble être décalé sur la droite par rapport aux autres données récoltées avec des camions de 8 m<sup>3</sup>. Il semble plutôt logique qu'une courbe de tendance pour l'ensemble des points ne serait pas très précise et que le volume du camion a bien un impact significatif sur les pressions hydrauliques mesurées. Suite à cette observation, un facteur empirique a été appliqué aux pressions hydrauliques des camions de 12,5 m<sup>3</sup> pour tenter de réaligner ces données et ainsi obtenir une bonne corrélation entre l'affaissement du béton frais et la mesure de pression hydraulique.

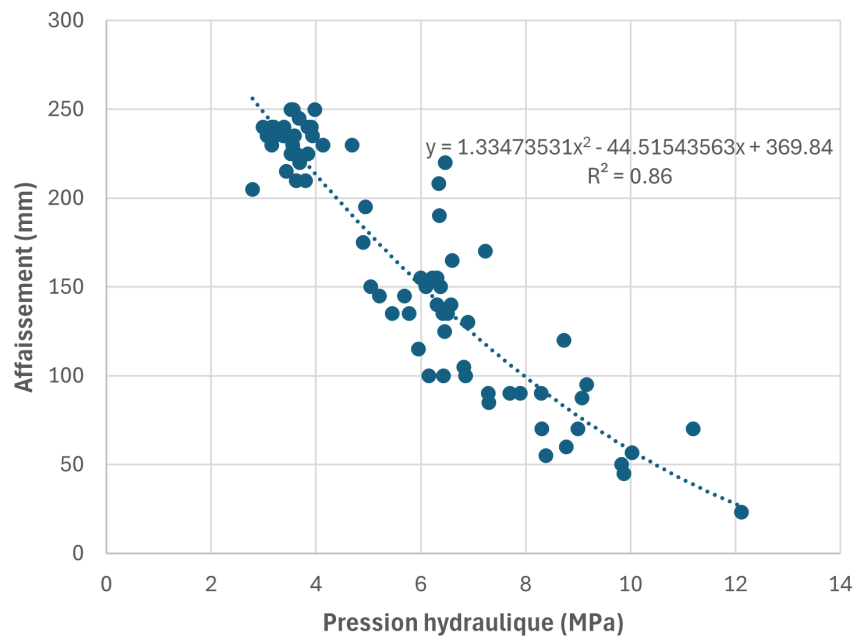


FIGURE 4.2 – Mesures de pression hydraulique nette à haute vitesse de rotation avec facteur de  $\frac{1}{2}$  pour les camions de 12,5 m<sup>3</sup> en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams

Après avoir essayé un premier facteur de  $\frac{2}{3}$  qui correspond approximativement au rapport de 8 m<sup>3</sup> sur 12,5 m<sup>3</sup>, les résultats se sont révélés assez intéressants. Suite à cela, d'autres facteurs ont été testés pour améliorer au maximum la corrélation entre l'affaissement et la pression hydraulique. Le facteur optimal vaut  $\frac{1}{2}$  à haute vitesse. Sur la FIGURE 4.2, les données de Drummondville se sont "décalées" vers la gauche pour se réaligner aux autres données. Ce décalage permet d'obtenir une assez bonne corrélation en utilisant une courbe de tendance polynomiale de degré 2.

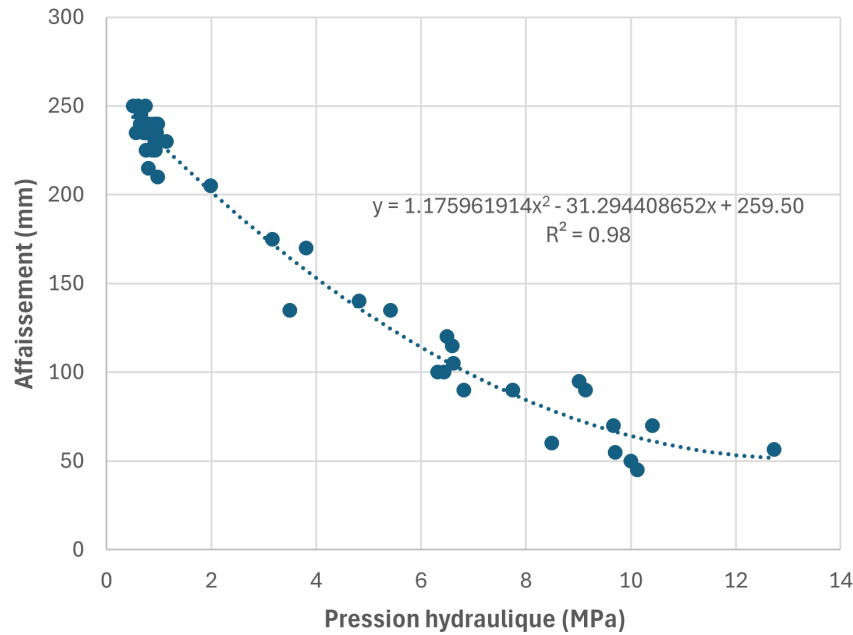


FIGURE 4.3 – Mesures de pression hydraulique nette à basse vitesse de rotation avec facteur de  $\frac{1}{3}$  pour les camions de 12,5 m<sup>3</sup> en fonction de la mesure d’affaissement au cône d’Abrams

La même procédure a été utilisée pour les données récoltées à basse vitesse de rotation de la toupie, dans ce cas le facteur optimal vaut  $\frac{1}{3}$  et permet une corrélation encore plus précise qu’à haute vitesse (FIGURE 4.3). Étant donné le manque de variabilité des fluidités de béton pour les données récoltées avec des camions de 12,5 m<sup>3</sup>, il n’est pas possible d’affirmer que les facteurs trouvés seront également applicables pour des bétons ayant un affaissement inférieur à 200 mm. D’autres campagnes d’essais sur des camions de 12,5 m<sup>3</sup> sont nécessaires pour approfondir l’utilisation d’un facteur permettant de relier l’ensemble des camions toupies. Étant donné l’incertitude qu’il y a sur ce facteur, les données provenant des camions de 12,5 m<sup>3</sup> ne seront plus utilisées pour la suite des analyses.

#### 4.2.2 Influence du pourcentage de remplissage du camion

Le second élément à vérifier avant d’analyser les données est le niveau de remplissage du camion. Il semble logique de dire que plus la toupie sera pleine, plus la pression hydraulique sera importante dans le moteur hydraulique. Comme il a déjà été démontré (Nikolla, 2021) auparavant, le niveau de remplissage de la toupie n’a plus d’influence à partir d’un certain niveau. Dans ce travail, les données ont été conservées à partir de 60 % du niveau de remplissage, c’est-à-dire 4,8 m<sup>3</sup> pour les camions de 8 m<sup>3</sup>.

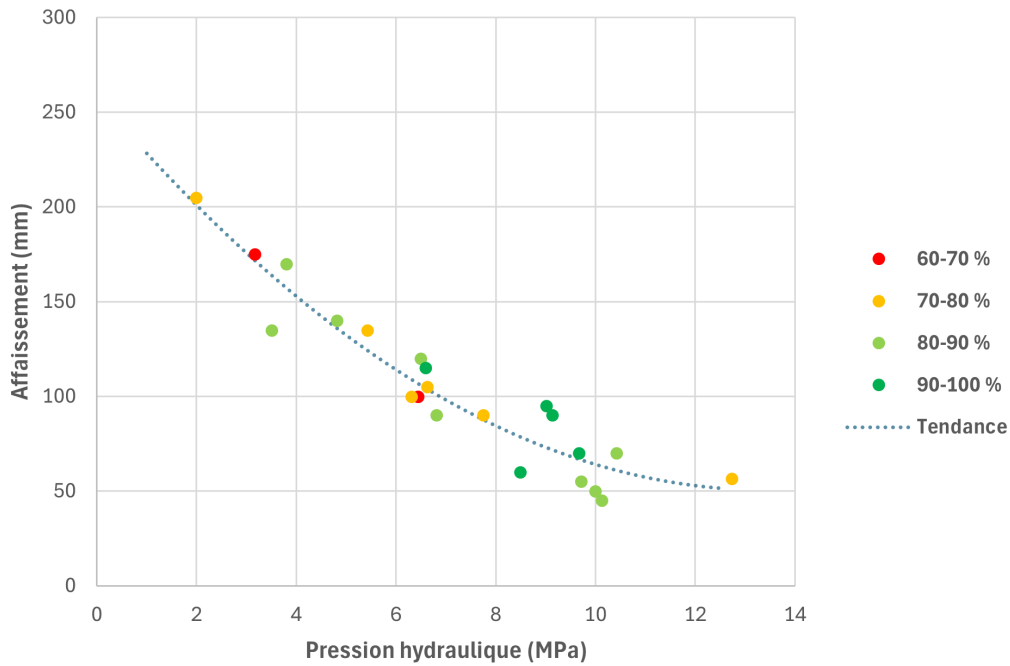


FIGURE 4.4 – Variation du pourcentage de remplissage du camion-toupie entre 60 et 100 % à basse vitesse de rotation en fonction de l’affaissement au cône d’Abrams

En affichant les points avec un gradient de couleur en fonction du pourcentage de remplissage du camion (FIGURE 4.4), il est possible de constater qu’à partir de 60 % le niveau n’influence plus la pression hydraulique mesurée. En effet, si chaque groupe de couleur était réparti de manière étagée par rapport à son niveau de remplissage, cela voudrait dire que celui-ci influence la pression hydraulique. Dans le cas présent, les couleurs sont réparties de manière aléatoire autour de la courbe de tendance.

Le même graphique a été réalisé pour les données récoltées à haute vitesse (FIGURE 4.5). Les observations sont similaires que pour la FIGURE 4.4 où la rotation de la toupie est à basse vitesse. Nous savons désormais qu’il est possible d’utiliser des données à partir de 60 % de remplissage du camion. Cela va permettre de trier l’ensemble des données afin de n’utiliser que les données pertinentes à analyser.

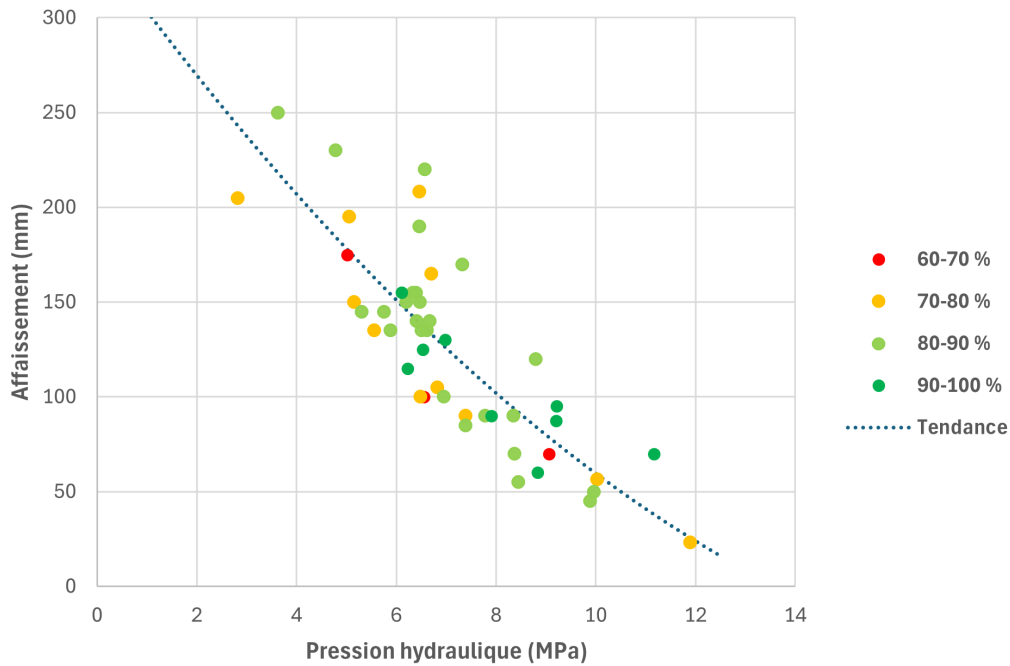


FIGURE 4.5 – Variation du pourcentage de remplissage du camion-toupie entre 60 et 100 % à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams

### 4.2.3 Comparaison campagnes d'essais 2021 et 2024

Comme expliqué précédemment, l'ensemble des données récoltées proviennent d'un premier temps des campagnes d'essais effectuées par Nikolla en 2021, et de la campagne effectuée durant ce travail en 2024. Étant donné que le matériel et les méthodes de traitements ont partiellement évolué entre ces campagnes, il est nécessaire de vérifier que ces données peuvent être utilisées ensemble afin d'être comparées. Effectivement, les capteurs utilisés ne sont plus les mêmes (gain de précision) et le traitement a également changé pour passer de *Python* à *Excel*. La FIGURE 4.6 montre les données de 2021 en bleu et les données de 2024 en orange. Il est possible de remarquer que les données sont en accord et qu'il est pertinent de les utiliser toutes ensemble. Ce graphique considère les données mesurées à basse vitesse de rotation de la toupie.

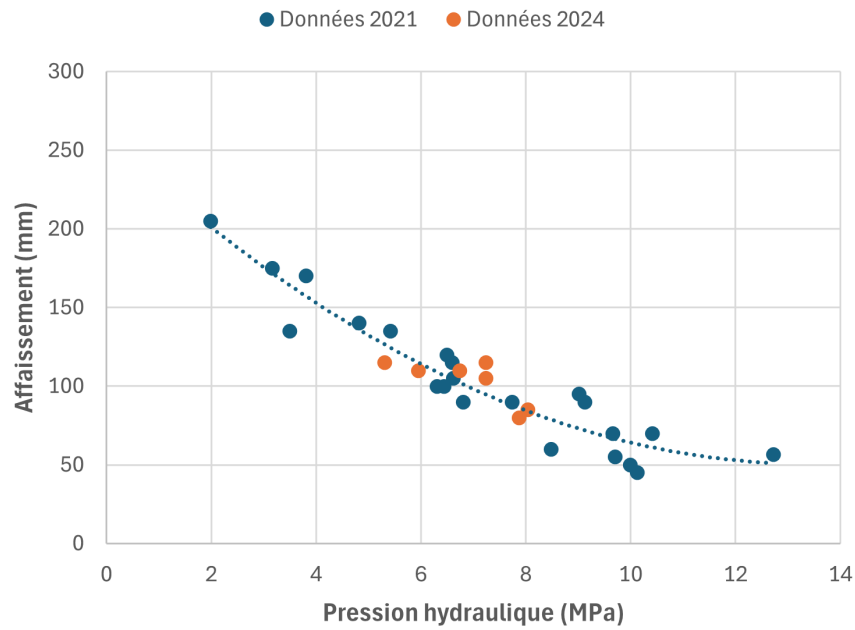


FIGURE 4.6 – Comparaison des données 2021 et 2024 pour la pression hydraulique en fonction de l'affaissement (basse vitesse de rotation)

La FIGURE 4.7 permet également de montrer que les données de 2021 et de 2024 peuvent être utilisées ensemble, mais cette fois-ci pour une haute vitesse de rotation de la toupie. Le changement de capteurs et des méthodes de traitements n'influencent en rien les données.

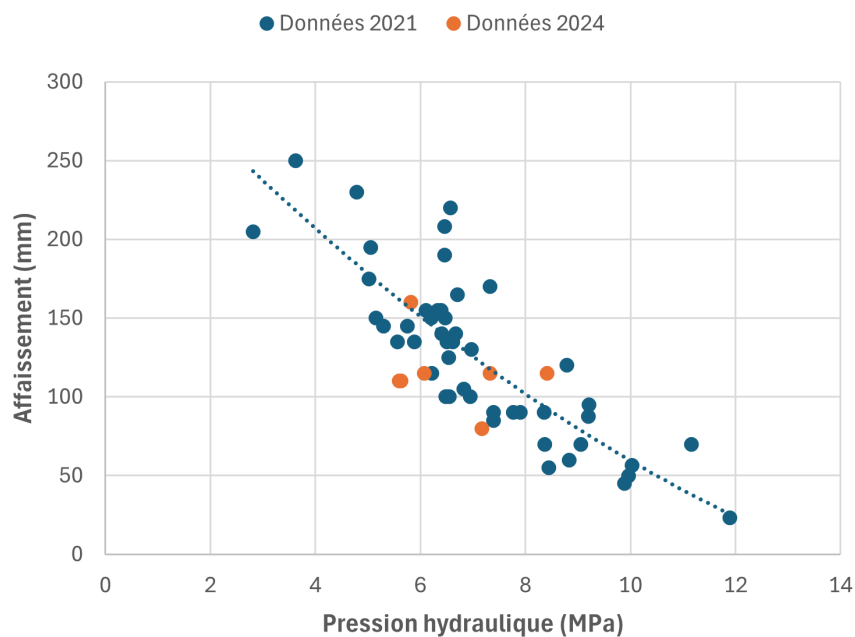


FIGURE 4.7 – Comparaison des données 2021 et 2024 pour la pression hydraulique en fonction de l'affaissement (haute vitesse de rotation)

#### 4.2.4 Élaboration des équations de corrélations

Désormais, il est possible de déterminer l'équation de la courbe de tendance polynomiale de degré deux en utilisant les données préalablement triées comme expliqué précédemment. Dans un premier temps, l'équation sera déterminée pour une basse vitesse de rotation de la toupie. Cette relation se trouve sur la FIGURE 4.6 et sera utilisée plus tard dans ce chapitre. À basse vitesse, la corrélation est assez forte, avec un  $R^2$  qui vaut 0,89. Cette importante corrélation se traduira plus tard par une bonne précision dans la prédiction de l'affaissement avec le capteur de pression hydraulique. Notons également que nous avons des données avec un affaissement entre 50 et 200 mm. Cependant, entre 100 et 150 mm, la concentration de points est plus élevée. Cela s'explique simplement par le fait que c'est dans cette fourchette d'affaissement que le béton est le plus souvent utilisé sur chantier. En effet, pour être utilisé sur chantier, le béton doit être suffisamment maniable sans pour autant être trop liquide.

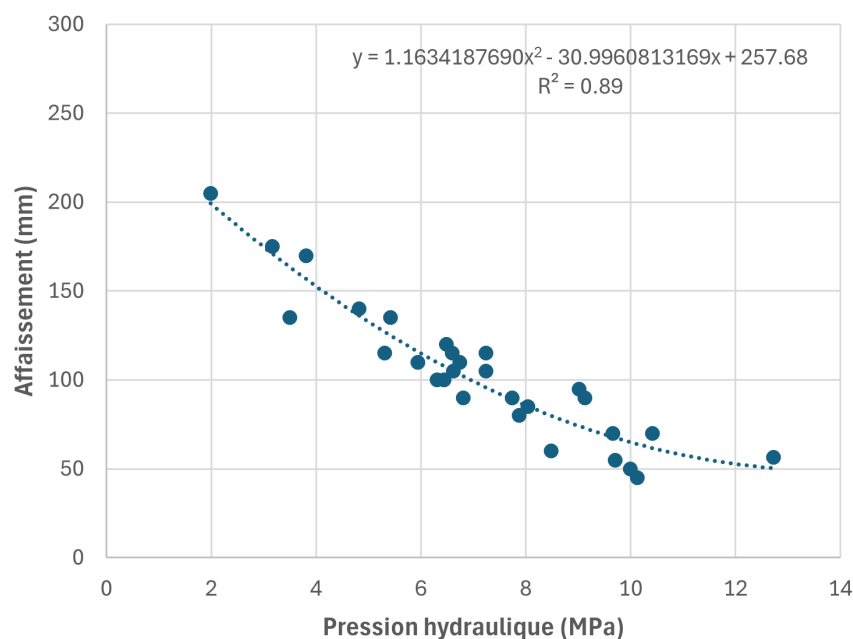


FIGURE 4.8 – Mesures de pression hydraulique nette à basse vitesse de rotation en fonction de la mesure d'affaissement au cône d'Abrams

Dans un second temps, il est possible de déterminer l'équation de la courbe de tendance pour une haute vitesse de rotation de la toupie. En comparaison à la basse vitesse, la corrélation à haute vitesse est moins forte, avec un  $R^2$  valant 0,64. Ce manque de précision se traduira plus tard par une moins bonne estimation de l'affaissement du béton frais. L'équation est visible sur la FIGURE 4.7 ainsi que l'ensemble des données utilisées. La plage d'affaissement est légèrement

plus large qu’à basse vitesse avec des mesures d’affaissement entre 25 et 250 mm. La même observation peut-être faite entre 100 et 150 mm, il y a une plus forte densité de points due à un plus grand nombre de mesures dans cette plage.

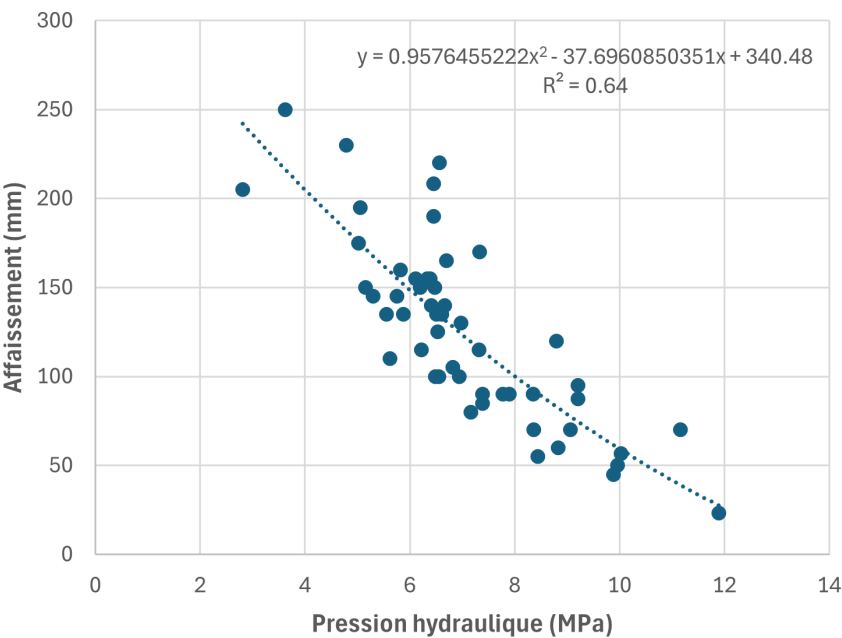


FIGURE 4.9 – Mesures de pression hydraulique nette à haute vitesse de rotation en fonction de la mesure d’affaissement au cône d’Abrams

Nous avons désormais les équations (TABLE 4.1) permettant d’estimer l’affaissement du béton frais sur base de la pression hydraulique mesurée par le capteur de pression hydraulique. Ces équations vont être utilisées dans la partie suivante pour estimer l’affaissement du béton avec les pressions hydrauliques récoltées durant les campagnes d’essais réalisées en 2021 et en 2024.

	Équation	R <sup>2</sup>
Basse Vitesse (3 RPM)	$y = 1,163418 x^2 - 30,996081 x + 257,68$	0,89
Haute Vitesse (14 RPM)	$y = 0,957645 x^2 - 37,696085 x + 340,48$	0,64

TABLE 4.1 – Équations permettant d’estimer l’affaissement du béton frais en fonction de la pression hydraulique mesurée

### 4.2.5 Estimation de l'affaissement

Pour comparer l'affaissement estimé par les différents capteurs et la mesure manuelle effectuée au cône d'Abrams, la forme de graphique suivante est utilisée (FIGURE 4.10). Ce genre de graphique permet de mettre en relation la valeur d'affaissement au cône d'Abrams en abscisse et l'affaissement estimé en ordonnée. La droite rouge correspond à une estimation parfaite par rapport à la valeur mesurée manuellement. Plus les points seront proches de cette droite, plus la prédiction du capteur sera précise. En ce qui concerne les deux droites vertes, ce sont simplement les limites d'écarts prescrites par la norme (TABLE 2.1). Ces droites permettent de mettre en lien le niveau de précision des capteurs et les prescriptions de la norme en termes d'erreur. Il est également possible de calculer le pourcentage de points se situant entre ces deux limites. Cela permet de comparer l'efficacité de chacune des méthodes de prédictions.

La FIGURE 4.10 montre les résultats obtenus avec la sonde *Command Alkon* déjà mise en place sur une grande quantité de camion malaxeur. Cette sonde permet dans un premier temps de comparer les résultats obtenus avec le capteur de pression hydraulique et s'assurer que son intégration au système est pertinente. En effet, si la sonde permettait déjà de prédire l'affaissement avec une très grande précision, l'utilisation d'un autre capteur n'aurait pas beaucoup d'intérêts. Il est important de préciser que la sonde n'affiche des valeurs d'affaissement que lorsque la toupie tourne à une faible vitesse de rotation (3 RPM). En observant le graphique, l'ensemble des points sont assez proches de la droite rouge et pas moins de 79,49 % des points sont dans la norme. Un tableau récapitulatif se trouve à la fin de cette section. Notons également que plus de la moitié des points ne se trouvant pas dans la norme sont des affaissements inférieurs à 100 mm. Ce constat n'était pas imprévisible, car nous savons que la sonde est moins précise pour les bétons à plus faible maniabilité.



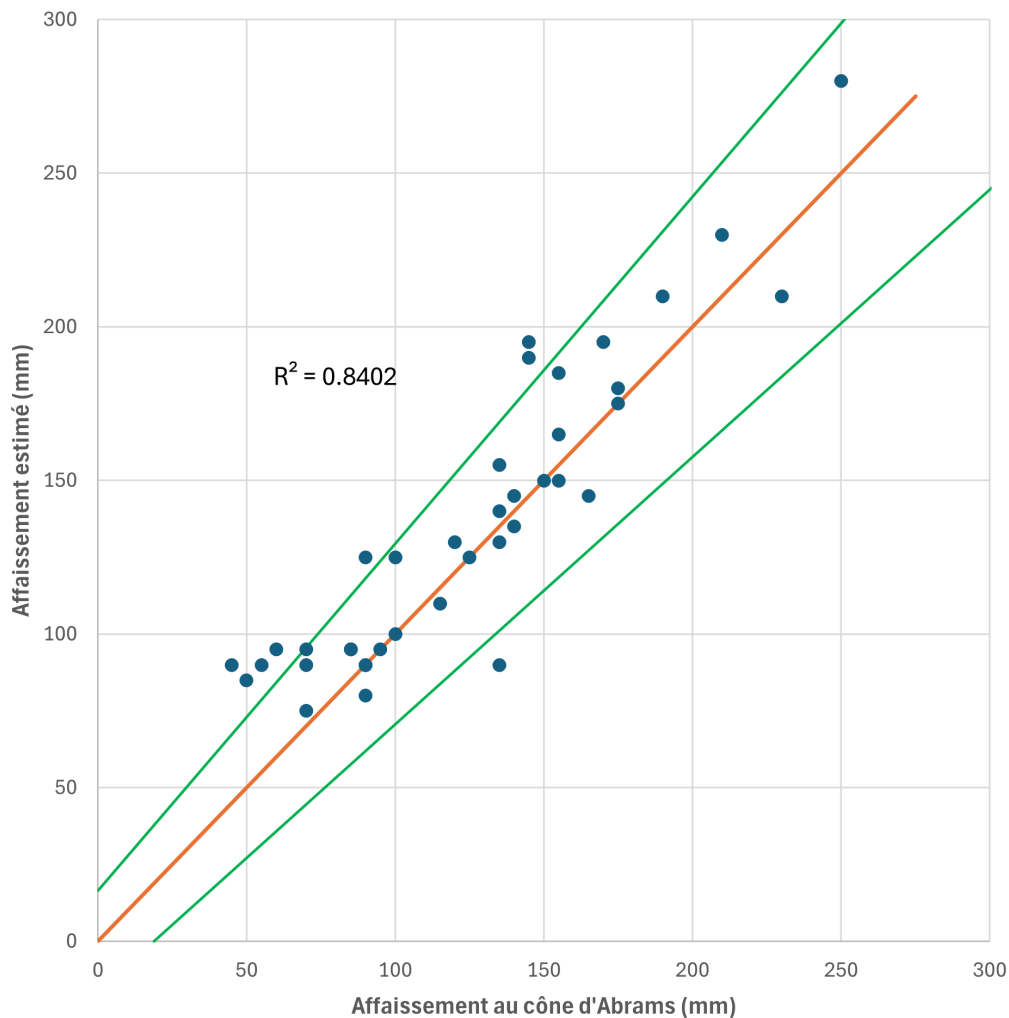


FIGURE 4.10 – Affaissement estimé avec la sonde en fonction de l’affaissement standard au cône d’Abrams

Nous pouvons désormais réaliser le même graphique pour le capteur de pression hydraulique. Dans un premier temps, la FIGURE 4.11 a été faite avec les estimations à basse vitesse de rotation. Visuellement, les résultats sont très intéressants, pratiquement tous les points sont compris dans la norme avec 87,76 % de points dans la norme. C’est presque 10 % de plus que la sonde seule, ce qui montre déjà l’intérêt d’intégrer ce deuxième capteur embarqué sur les camions. Comme pour la sonde, les valeurs les moins précises correspondent majoritairement à des bétons plus raides, ce qui signifie que le capteur de pression hydraulique est également imprécis pour estimer l’affaissement des bétons à faible maniabilité. Comme dit précédemment, la sonde ne donne des valeurs d’affaissement qu’à basse vitesse de rotation, une comparaison entre le capteur et la sonde a donc du sens dans ce cas.

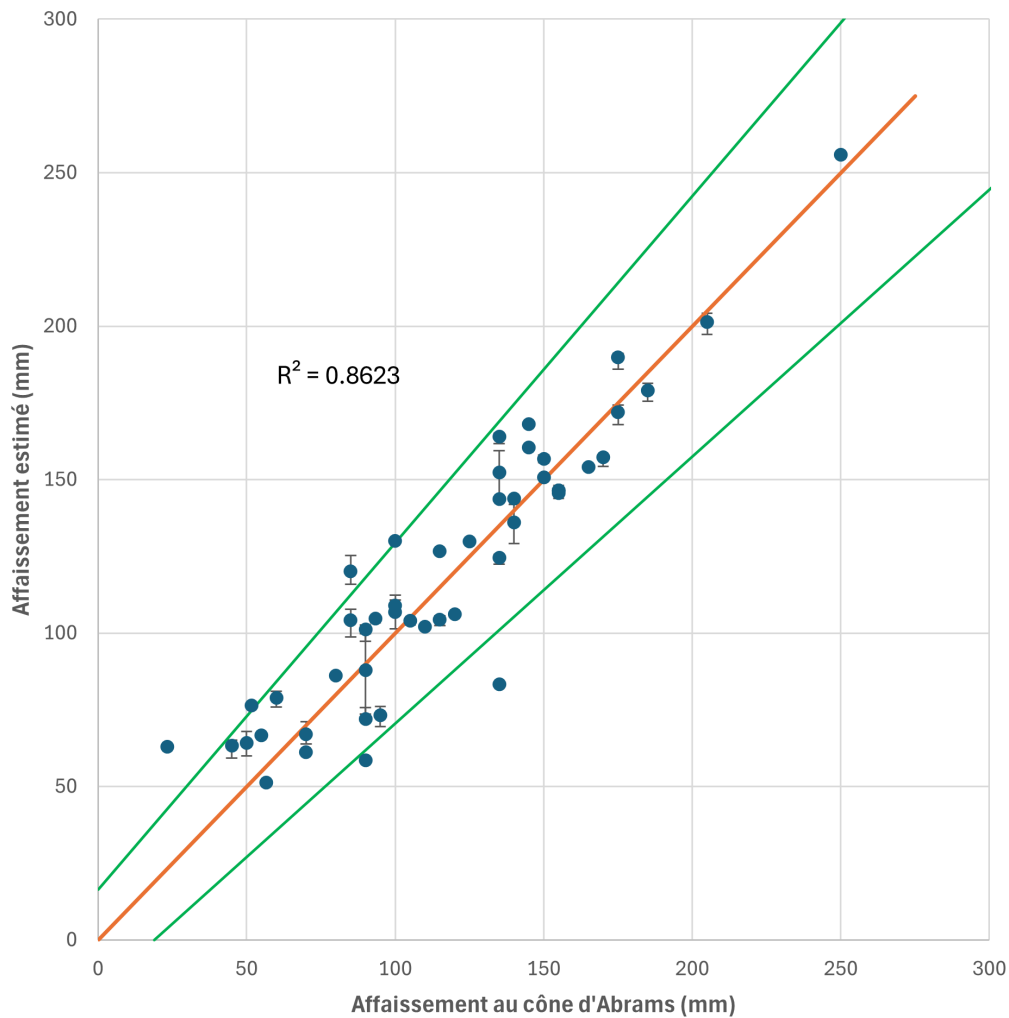


FIGURE 4.11 – Affaissement estimé avec le capteur de pression hydraulique à basse vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams

Dans un second temps, il est intéressant de regarder ce que le capteur de pression hydraulique peut donner comme résultats lorsque la toupie est en rotation à haute vitesse. En effet, lors du malaxage initial en usine, la toupie tourne à haute vitesse et il pourrait être utile d'avoir une mesure d'affaissement pour aider le chauffeur du camion à ajuster la maniabilité de son mélange. Nous remarquons directement sur la FIGURE 4.12 que le capteur de pression hydraulique perd beaucoup de précision lorsque la toupie tourne à haute vitesse. Effectivement, seulement 75 % des points sont dans les normes. Bien que cette valeur soit déjà élevée, elle est inférieure à celle de la sonde. Notons que les points manquants de précisions ne sont plus seulement pour des bétons raides, mais pour des bétons ayant un affaissement inférieur à 200 mm. Nous savons maintenant que le capteur de pression hydraulique est plus précis que la sonde pour des basses vitesses de rotations, mais manque de précision à haute vitesse.

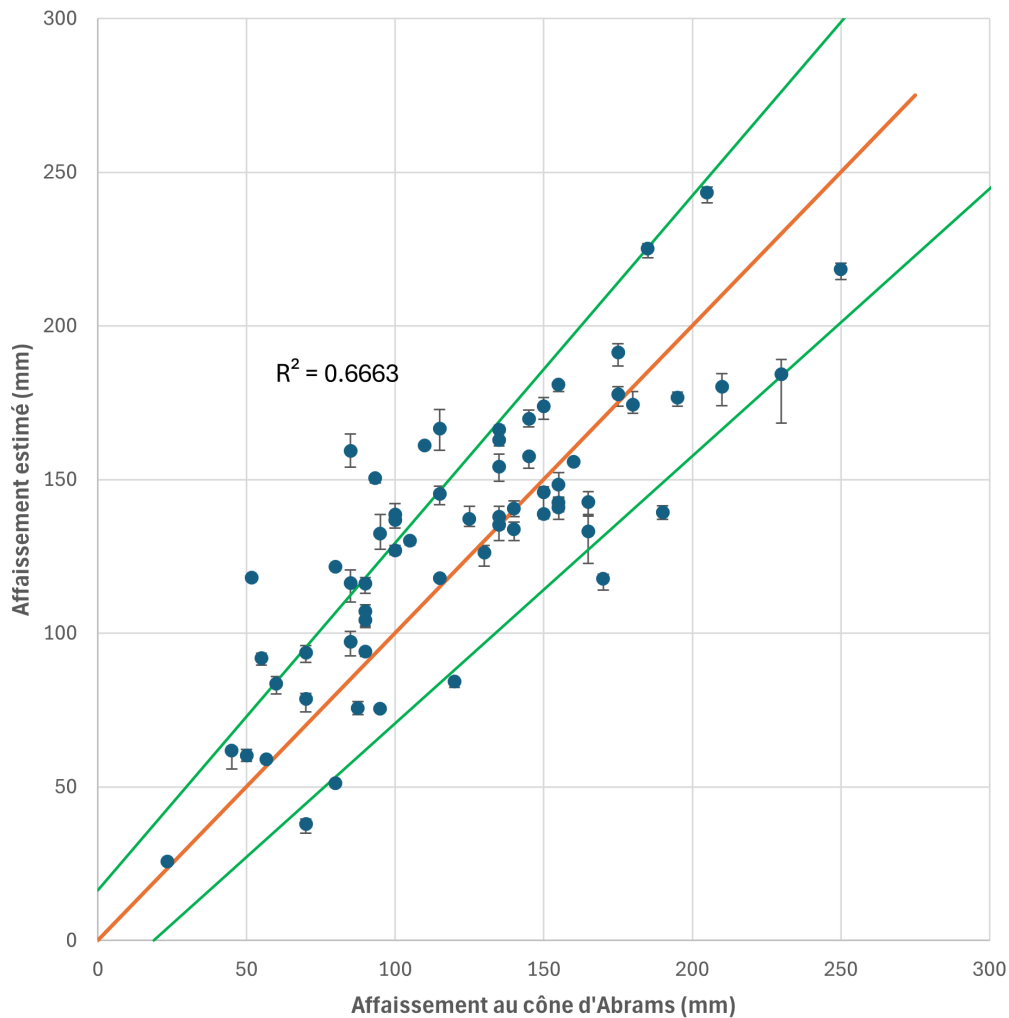


FIGURE 4.12 – Affaissement estimé avec le capteur de pression hydraulique à haute vitesse de rotation en fonction de l’affaissement standard au cône d’Abrams

Pour améliorer la précision des résultats obtenus avec les différents capteurs, il serait intéressant de combiner les différentes estimations. En parlant de combinaison, le principe est assez simple et il s’agit pour commencer d’effectuer une moyenne des valeurs estimées par les capteurs. En faisant cela, nous pouvons combiner plusieurs méthodes d’estimations et/ou différents capteurs. La première combinaison intéressante trouvée est la combinaison de la sonde avec le capteur de pression hydraulique à haute vitesse. Les résultats sont visibles sur la FIGURE 4.13 sous le même format que précédemment. Il est possible de remarquer qu’en combinant ces deux méthodes de prédictions, la précision est nettement améliorée. En effet, le nombre de points dans la norme passe de 78,49 % pour la sonde et de 75 % pour le capteur de pression hydraulique à 89,74 %. Cela montre clairement que la combinaison de plusieurs cap-

teurs augmente drastiquement la précision de l'estimation de l'affaissement du béton frais. Et le manque de précision se situe encore une fois pour les bétons plus raides. En ce qui concerne la combinaison du capteur de pression hydraulique à basse vitesse et la sonde, le graphique se trouve dans l'Annexe J (FIGURE 5.1), mais la précision augmente également avec un pourcentage de points dans la norme de 87,88 % contre 87,76 % pour le capteur de pression seul. Cette amélioration est moins significative, mais est tout de même intéressante. La combinaison du capteur de pression hydraulique à basse vitesse et à haute vitesse permet également d'augmenter la précision de l'estimation avec 89,80 % des points dans la norme.

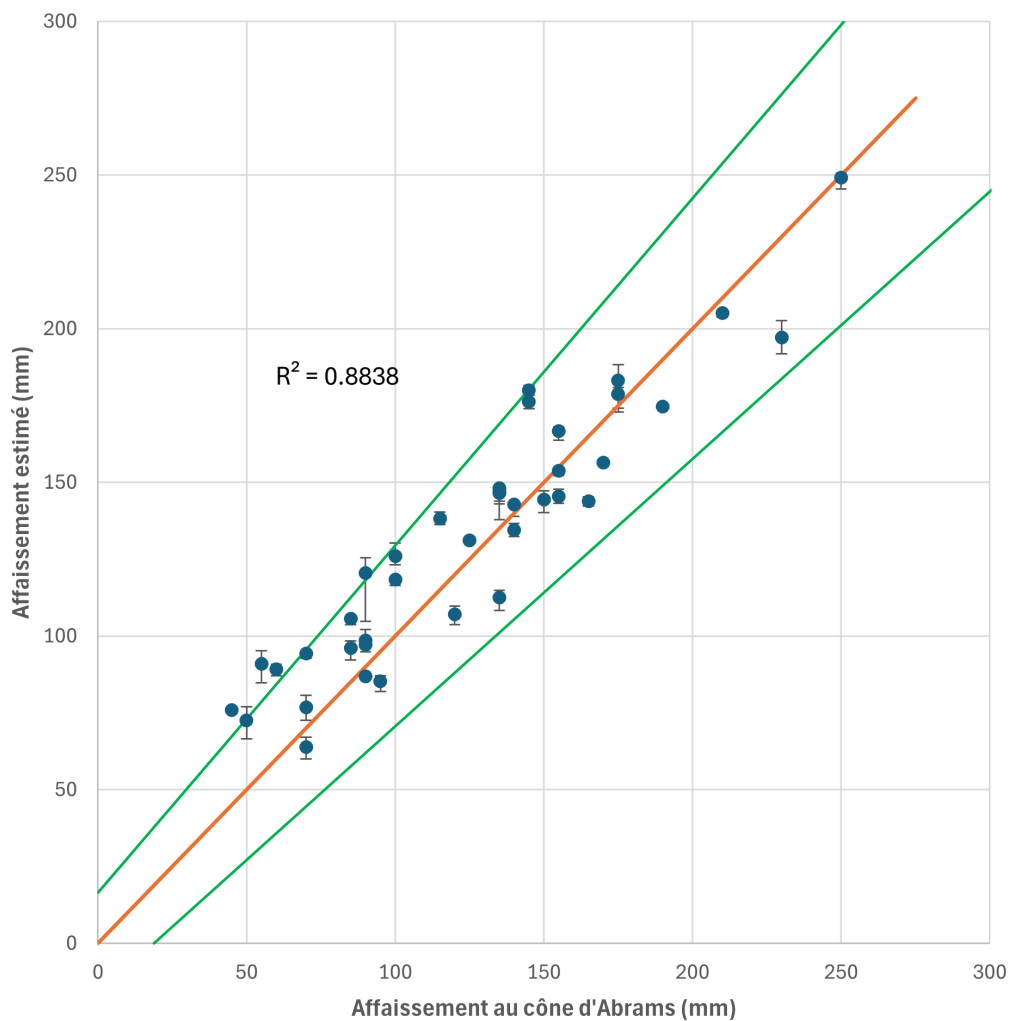


FIGURE 4.13 – Affaissement estimé en combinant la sonde et le capteur de pression hydraulique à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams

Cependant, la dernière combinaison qui a été testée est une combinaison de trois méthodes ; le capteur de pression hydraulique à basse vitesse, à haute vitesse et la sonde. Cette combinaison est la plus précise de toutes et les résultats sont visibles sur la FIGURE 4.14. Le pourcentage de points compris dans la norme est le plus élevé avec 90,91 % de points dans la norme. Les observations sont similaires aux méthodes précédentes avec un manque de précision pour les bétons moins maniabiles. Bien qu'en réalité, le capteur de pression hydraulique ne peut donner une valeur d'affaissement à la fois à basse vitesse et à la fois à haute vitesse, il est imaginable de penser à un système qui permettrait de stocker temporairement une valeur d'affaissement estimée à un instant " $t$ " à haute vitesse, et de pouvoir réutiliser cette valeur à un instant " $t + \Delta t$ " lorsque la toupie tourne à basse vitesse, tout cela en considérant un  $\Delta t$  faible pour éviter que la maniabilité du béton frais n'ait considérablement changée.

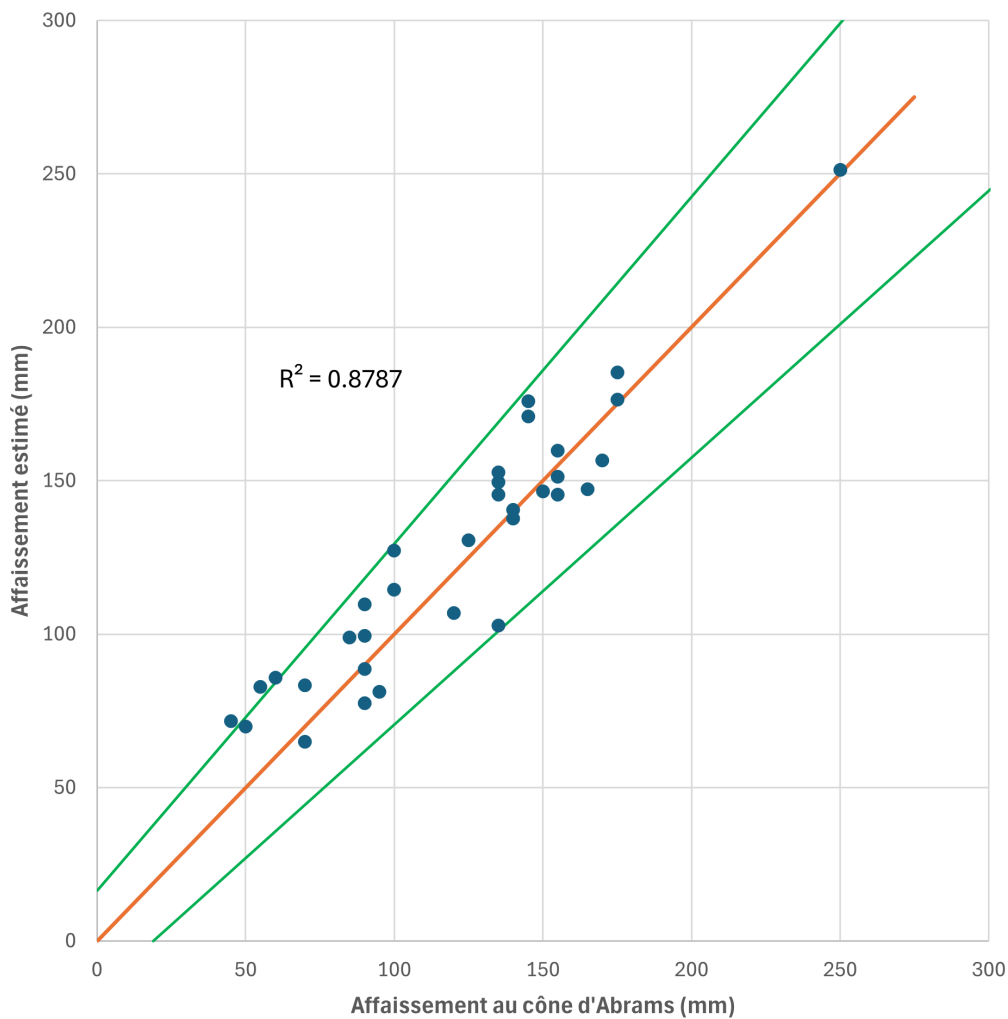


FIGURE 4.14 – Affaissement estimé en combinant la sonde, le capteur de pression hydraulique à basse vitesse de rotation et à haute vitesse de rotation en fonction de l'affaissement standard au cône d'Abrams

Désormais, nous savons que la combinaison de plusieurs méthodes d'estimations de l'affaissement du béton frais permet d'améliorer la précision de la mesure. L'ensemble des résultats sont repris dans la TABLE 4.2. Elle contient pour chaque méthode d'estimation le nombre de points dans la norme, le nombre de points total utilisés ainsi que le pourcentage de points se trouvant dans la norme.

<b>Méthode d'estimation</b>	<b>Points Norme</b>	<b>Points TOTAL</b>	<b>Pourcentage Norme (%)</b>
<b>Sonde</b>	31	39	78,49
<b>CPH BV</b>	43	49	87,76
<b>CPH HV</b>	48	64	75,00
<b>CPH BV + Sonde</b>	29	33	87,88
<b>CPH HV + Sonde</b>	35	39	89,74
<b>CPH BV + CPH HV</b>	44	49	89,80
<b>CPH BV + CPH HV + Sonde</b>	30	33	90,91

TABLE 4.2 – Récapitulatif du nombre de données et du pourcentage compris dans la norme pour chaque estimation

#### 4.2.6 Comparaison entre prédiction et affaissement au cône d'Abrams

Afin d'approfondir la comparaison entre toutes les méthodes étudiées, il est possible de calculer l'écart entre l'affaissement estimé et l'affaissement mesuré avec le cône d'Abrams. Cet écart est donc calculé pour chacune des données utilisées, ce pour chacune des méthodes. Pour plus de précision, trois plages d'affaissement sont analysées séparément; inférieur à 75 mm, entre 75 et 150 mm et supérieur à 150 mm. Ces trois plages permettent d'analyser différentes maniabilités de bétons frais. En sachant que les capteurs manquent de précision pour les bétons moins maniables, il est intéressant de pouvoir quantifier cela et de le confirmer. Une fois les écarts calculés, une moyenne est faite avec toutes ces valeurs pour connaître l'écart moyen pour chaque plage et pour chaque méthode. Ces résultats sont représentés sur la FIGURE 4.15. Le manque de précision pour les faibles affaissements se remarque directement et d'autant plus pour la sonde. Ce graphique confirme ce qui a pu être remarqué dans la partie précédente, les combinaisons sont globalement plus précises que les capteurs seuls et la précision est plus élevée quand le béton est plus fluide.

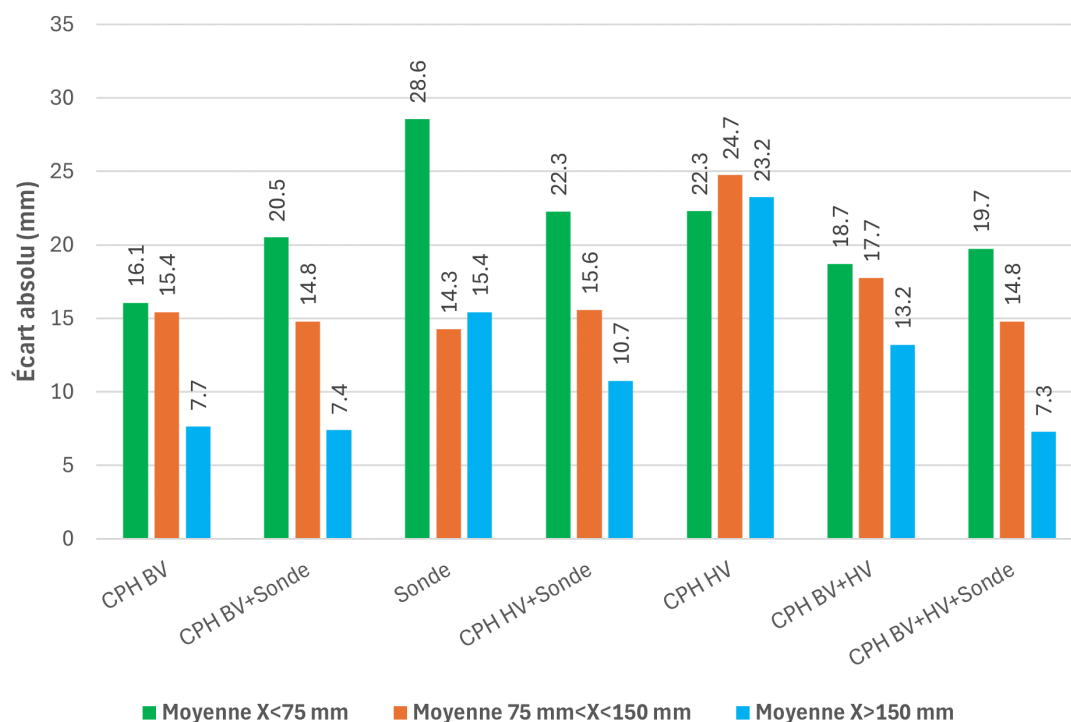


FIGURE 4.15 – Moyennes des écarts absolus entre la prédiction et la mesure d’affaissement au cône d’Abrams

Le graphique précédent utilise les écarts absolus, pour mieux comparer chaque plage d’affaissement, il est préférable d’utiliser les écarts relatifs. La FIGURE 4.16 représente ces écarts relatifs comme sur le graphique précédent. Les observations sont très similaires au graphique précédent, mais le manque de précision pour les bétons peu maniables est encore plus visible avec plus de 50 % d’écart pour la sonde et presque 40 % pour les autres méthodes. Ce graphique montre également que les différentes combinaisons testées sont plus précises que les capteurs seuls. Il y a clairement un gain de précision lorsque le béton se fluidifie.

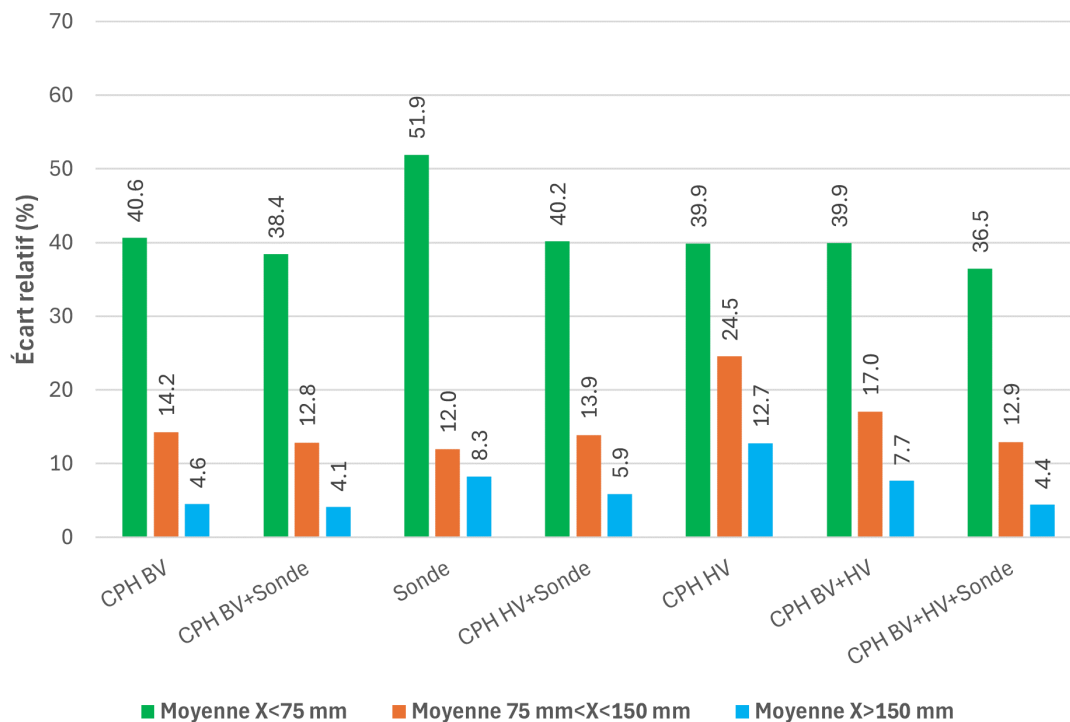


FIGURE 4.16 – Moyennes des écarts relatifs entre la prédiction et la mesure d'affaissement au cône d'Abrams

### 4.3 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis de mettre en avant les avantages et les inconvénients des capteurs embarqués en camion-toupie. L'utilisation d'un deuxième capteur a un intérêt assez clair et il a été démontré que la combinaison des deux capteurs pouvait augmenter la précision de l'estimation de l'affaissement avec environ un gain de 10 % de points se trouvant dans la norme. Le deuxième capteur mesurant la pression hydraulique au niveau du moteur hydraulique du camion apporte aussi un gain de précision par rapport à la sonde pour les bétons plus fermes. Les résultats sont prometteurs quant à l'ajout d'une deuxième méthode de mesure de l'affaissement. Il a également été montré que le capteur de pression hydraulique pouvait donner des résultats intéressants à haute vitesse de rotation de la toupie.



# Chapitre 5

## Conclusion

L'objectif principal de ce travail consistait à améliorer la méthode d'estimation en continu de l'affaissement du béton frais pour une large gamme de maniabilités de béton et pour une large gamme de vitesses de rotation du malaxeur. Pour atteindre cet objectif, deux capteurs ont été utilisés : le capteur de pression hydraulique et la sonde de *Command Alkon*. Pour augmenter la précision de l'estimation, c'est en particulier la complémentarité des mesures du capteur de pression et de la sonde qui a été étudiée plus précisément. L'utilisation de ces deux capteurs a en effet permis de mettre en place une méthode efficace de prédiction de l'affaissement en continu du béton frais.

Un premier paramètre concernait l'impact du volume du camion-toupie : il a été montré qu'il pouvait influencer de manière significative la pression hydraulique mesurée par le capteur de pression hydraulique. Un facteur a été introduit pour compenser cette différence de volume entre les différents camions et les premiers résultats montrent que ce facteur permettrait de corriger ce paramètre. Des recherches complémentaires seraient intéressantes pour approfondir l'impact du volume du camion-toupie et pouvoir déterminer plus précisément ce facteur.

Toujours en rapport avec le volume du camion-toupie, le pourcentage de remplissage du camion a également un impact sur la pression hydraulique mesurée. Si ce second paramètre est également important à prendre en compte, il est apparu que, à partir de 60 % de remplissage, une augmentation du taux de remplissage n'a plus d'influence sur la mesure de pression.

Ce paramètre a pu dès lors être écarté dans la suite des analyses simplement en écartant les mesures provenant de camions remplis à moins de 60 %.

Dans ce travail de recherche, les mesures de pression hydraulique à haute vitesse ont été introduites afin de couvrir une plage de vitesse de rotation de la toupie plus importante. En effet, dans la précédente étude menée par Nikolla, seules les mesures à basse vitesse de rotation étaient analysées. Bien que la prédiction de l'affaissement du béton frais à haute vitesse soit beaucoup moins précise qu'à basse vitesse, les résultats obtenus sont intéressants et les prédictions presque aussi précises que les prédictions de la sonde *Command Alkon* seule.

Finalement, il a été montré que les différents capteurs manquaient de précision pour les bétons plus raides. Cependant, la combinaison de plusieurs méthodes de mesures permet d'améliorer la prédiction pour toutes les maniabilités de bétons analysées, y compris les bétons à consistance plus ferme. Ces combinaisons sont très prometteuses et montre bien que l'adjonction d'une deuxième méthode de mesure est pertinente afin de mieux estimer l'affaissement en continu du béton frais.

## **Limites**

Il est important de noter que le nombre de données utilisées pour réaliser ce travail reste limité. En effet, la procédure pour récupérer les données prend encore beaucoup de temps. Ce manque de données peut donner aux conclusions un caractère moins général, qu'il conviendrait de confirmer.

## **Recommandations**

Pour palier à ce manque de données, il serait intéressant de mettre en place des campagnes d'essais plus importantes en installant par exemple les capteurs sur plusieurs camions afin de récupérer un plus grand nombre de données sur une même journée. Une autre option serait d'installer à nouveau le capteur de pression hydraulique sur le camion appartenant à

l'Université Laval afin de pouvoir travailler indépendamment de l'usine de production. Cela permettrait d'épargner le temps perdu durant le transport du béton frais, mais permettrait également d'étudier différentes compositions et maniabilités de béton. En effet, les données récoltées avec les camions en production ne donnent pas de liberté sur les propriétés du béton.

## **Perspectives**

Ce travail a permis de mettre en avant que l'utilisation de différents capteurs pour caractériser les propriétés du béton frais était intéressante. Le développement de ces capteurs doit être approfondi pour améliorer la précision des mesures. L'utilisation d'un tel système de mesure en continu de l'affaissement du béton frais permettrait aux usines de production de gagner du temps lors des livraisons tout en assurant une précision accrue de la valeur d'affaissement demandée par le client. Il serait possible d'imaginer à long terme que le processus soit entièrement automatisé entre le remplissage du camion à l'usine et le déchargement complet de celui-ci sur le chantier. En effet, avec un contrôle continu de la maniabilité du béton frais, l'ajout d'eau et la vitesse de rotation de la toupie pourraient être contrôlés par l'intelligence artificielle pour obtenir le béton souhaité lors de la livraison.

# Bibliographie

1. ACI. (2002). *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete (Reapproved 2009)*.
2. ACI PCR-238.1. (2008). *Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete, American Concrete Institute*.
3. AFNOR. (2017). *Norme NF P18-452*.
4. Aïtcin, P. C., & Mindess, S. (2013). *Ecostructures en béton : Comment diminuer l’empreinte carbone des structures en béton*.
5. Aïtcin, P. C. (2019). *The influence of the water/cement ratio on the sustainability of concrete. In Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00017-4>
6. Assh, D. (1998). *System for Control of the Condition of Mixed Concrete*.
7. ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.
8. ASTM International. (2021). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*.  
<https://doi.org/10.1520/C0125-21A>
9. Baron, J., & Lesage, R. (1976). *La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier. Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche, 64*.
10. Baron, J., Sauterey, R., Darmois, G., Maso, J.-C., Regourd, M. (1982). *Le béton hydraulique : connaissance et pratique. Presses de l’École nationale des ponts et chaussées*.
11. Beaupré, D. (2012). *Mixer-Mounted Probe Measures Concrete Workability IBB Probe data provide very good correlations with slump or flow tests*.
12. Beaupré, D., Chapdelaine, J., & Chapdelaine, F. (2019). *Probe and Method for Obtaining rheological property value*.
13. Berger, X. (2022). *Proposition de recherche Préparation oral de doctorat (GCI-8084)*.
14. CCQ. (2019). *Enjeux de main-d’œuvre dans l’industrie de la construction au Québec*.
15. Charonnat, Y., & Beitzel, H. (1997). *Efficiency of Concrete Mixers Towards Qualification of Mixers*.
16. CSA. (2019). *Béton : constituants et exécution des travaux/Procédures d’essai et pratiques normalisées pour le béton*.

17. Eau Seine Normandie. (2007). *Les centrales de production de béton prêt à l'emploi du bassin Seine-Normandie, Livret 3*
18. Ferraris, C. F., & Lynn, B. E. (2003). *Comparison of concrete rheometers : international tests at MB (Cleveland OH, USA) in May, 2003.*  
<https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7154>
19. Ferraris, C. F., Billberg, P., Ferron, R., Feys, D., Hu, J., Kawashima, S., Koehler, E., Sonebi, M., Tanesi, J., & Tregger, N. (2017). *Role of Rheology in Achieving Successful Concrete Performance Properties must be balanced to manage segregation, surface finish, pumping pressure, or formwork pressure.*
20. Flatt, R. J., Martys, N., & Bergström, L. (2004). *The reology of cementitious materials. MRS Bulletin 29.*  
<https://doi.org/10.1557/MRS2004.96>
21. Global Cement And Concrete. (2021). *Global Cement and Concrete Industry Announces Roadmap To Achieve Groundbreaking 'Net Zero' CO2 Emissions By 2050.*  
<https://gccassociation.org/news/global-cement-and-concrete-industry-announces-roadmap-to-achieve-groundbreaking-net-zero-co2-emissions-by-2050/>
22. Gouvernement du Canada. (2021). *Déclaration commune : L'industrie canadienne du ciment et le gouvernement du Canada annoncent un partenariat.*  
<https://ised-isde.canada.ca/site/ised/fr/declaration-commune-lindustrie-canadienne-ciment-gouvernement-canada-annoncent-partenariat>
23. Hilt, M. (2019). *Évaluation des bénéfices économiques et environnementaux de l'intégration à la production de béton prêt à l'emploi d'un système de contrôle continu situé à l'intérieur d'une bétonnière.*
24. Hu, C. (1995). *Rhéologie des bétons fluides.*
25. Iizuka, A., Sasaki, T., Honma, M., Yoshida, H., Hayakawa, Y., Yanagisawa, Y. & Yamasaki, A. (2017). *Pilot-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant and Simultaneous Production of Calcium Carbonate. Chemical Engineering Communications, 204.*
26. Khayat, K. H., & Libre, N. A. (2014). *Automated Measurement and Control of Concrete Properties in a Ready Mix Truck with VERIFI.*
27. Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2003). *Summary of Concrete Workability Test Methods Sponsored by the Aggregates Foundation for Technology, Research and Education.*
28. Le Label BENOR - Site Internet. (s.d). Consulté le 25 mars 2024 sur <https://www.benor.be/fr/benor-asbl/label-benor/>
29. Lobo, C. L., & Gaynor, R. D. (2006). *Ready-mixed concrete. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials : ASTM International.*
30. Mokéddem, S. (2012). *Contrôle de la rhéologie d'un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l'aide de la sonde Viscoprobe. École Centrale de Nantes (ENC).*

31. Newman, J., John, B., & Choo, B. S. (2003). *Advanced concrete technology : constituent materials*. Butterworth-Heinemann
32. Nikolla, D. (2021). *Mesure automatique de l'affaissement en bétonnière pour une large gamme de maniabilités de béton*.
33. Perspectives financières du béton. (2021). *Tendances des volumes et des prix du béton prêt à l'emploi*.  
<https://concretefinancialinsights.com/us-concrete-industry-data>
34. Poullain, P. (2003). *Etude comparative de l'écoulement d'un fluide viscoplastique dans une maquette de malaxeur pour bétons : PIV, IRM et simulation numérique*.
35. Roussel, N., & Coussot, P. (2006). *Ecoulements d'affaissement et d'étalement*. *Revue Européenne de Génie Civil*, 10.  
<https://doi.org/10.1080/17747120.2006.9692814>
36. Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., & Brumaud, C. (2012). *The origins of thixotropy of fresh cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, 42.
37. Sherritt, R. G., Chaouki, J., Mehrotra, A. K. & Behie, L. A. (2003). *Axial dispersion in the three-dimensional mixing of particles in a rotating drum reactor*. *Chemical Engineering Science*, 58.
38. Siccardi, P. (2022). *Contribution à l'amélioration de la production de béton prêt à l'emploi : Exploitation de capteurs embarqués pour la détection de fin de malaxage, la mesure de densité et l'anticipation de l'évolution de l'affaissement*.
39. Tattersall, G. H., & Banfill, P. F. G. (1983). *The rheology of fresh concrete*.
40. Wallevik, O.H., Feys, D., Wallevik, J.E., Khayat, K.H. (2015) *Éviter les interprétations inexactes des mesures rhéologiques pour les matériaux à base de ciment*. *Ciment and Concrete Research*.

# **Annexes**

# Annexe A : Spécifications communes capteurs de pression hydraulique Omega

## Rugged, General Purpose Transducer

Common Specifications for 100 mV, 0 to 5 Vdc, and 0 to 10 Vdc, 4 to 20 mA Outputs



- ✓ 1, 2 & 5 psi Low Pressure Ranges!
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ Rugged Solid State Design
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Static Accuracy
- ✓ IP 65 Protection Class

Omega's PX309 Series models below 100 psi use a high-accuracy silicon sensor protected by an oil-filled stainless steel diaphragm. Units 100 psi and above use silicon strain gages molecularly bonded to the stainless steel diaphragm.

### Common Specifications

**Ranges:** -15 to 50 psig, 0 to 1000 psia, 100 to 10,000 psig

**Accuracy (Combined Linearity, Hysteresis and Repeatability):**  $\pm 0.25\%$  BSL, max

**Minimum Resistance Between Transducer Body and Any Wire:** 1M  $\Omega$  @ 25 Vdc

**Calibration:** In vertical direction with fitting down. Compound range units are calibrated from Vac to FSO

**Pressure Cycles:** 10 million, minimum

**Pressure Overload:** -15 to 50 psig and 0 to 1000 psia: 3 times rated pressure or 20 psi whichever is greater, 100 to 10,000 psig: 2 times rated pressure

**Burst Pressure:** -15 to 50 psig and 0 to 1000 psia: 4 times rated pressure or 25 psi whichever is greater, 100 to 10,000 psig: 5 times rated pressure

**Long Term Stability (1 Year):**  $\pm 0.25\%$  of FS, typical

**Operating Temperature:** -40 to 85°C (-40 to 185°F)

**Pressure Port:** 1/4-18 MNPT

**Pressure Port Material:** -15 to 50 psig and 0 to 1000 psia: 316 SS, 100 to 10,000 psig: SS 316 or 17-4

**Bandwidth:** DC to 1 kHz (typical)

**CE:** Compliant

**Shock:** 50 g, 11 ms half-sine

**Vibration:**  $\pm 20$  g

**Response Time:** <1 millisecond

**Weight:**

PX309/PX319/PX329/PX359:

<90 grams

**IP Rating:** IP65

**RoHS:** Compliant

Order a snubber to protect your pressure transducer!



PS-4G, shown actual size.

Snubbers protect sensors from fluid hammers/spikes.

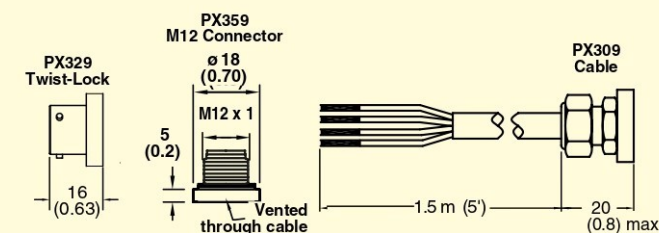
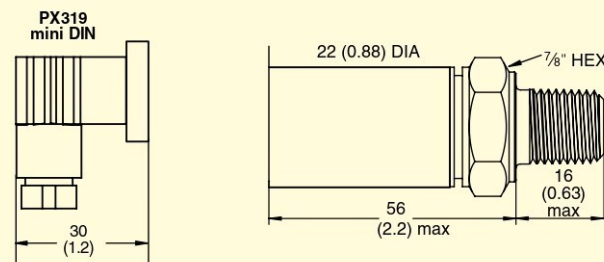
mV Output Wiring			
Wiring	Cable	M12 and mini DIN	Twist-Lock
Excitation (+)	Red	Pin 1	Pin A
Output (+)	White	Pin 3	Pin C
Output (-)	Green	Pin 4	Pin D
Excitation (-)	Black	Pin 2	Pin B
Spare	—	—	Pin E
Vent	—	—	Pin F

5 and 10 Vdc Output Wiring			
Wiring	Cable	M12 and mini DIN	Twist-Lock
Excitation (+)	Red	Pin 1	Pin A
Excitation (-)	Black	Pin 2	Pin B
Output (+)	White	Pin 3	Pin C
N/C†	—	Pin 4	Pin D
Spare	—	—	Pin E
Vent	—	—	Pin F

mA Output Wiring			
Wiring	Cable	M12 and mini DIN	Twist-Lock
Supply (+)	Red	Pin 1	Pin A
Supply (-)	Black	Pin 2	Pin B
N/C†	—	Pin 3	Pin C
N/C†	—	Pin 4	Pin D
Spare	—	—	Pin E
Vent	—	—	Pin F

† N/C: Do not connect any wires to this pin.

Dimensions: mm (inch)  
 $\phi$  = diameter





# Annexe B : Fiche Technique capteur de pression hydraulique PX309-3KG-5V

## How to Order PX309 Series with 0 to 5 Vdc Output

0 to 5 Vdc Output  
0-1 to 0-10,000 psi  
0-70 mbar to 0-690 bar

### PX309 Series



**5V Output Specifications**  
(In Addition to Common Specifications on page 2)  
Total Error Band (Includes Linearity, Hysteresis, Repeatability, Thermal Hysteresis and Thermal Errors, Not Including Zero and Span Setting Accuracy):  $\pm 1.0\%$   
(5 psig/psia is  $\pm 1.5\%$ , 2 psig is 3.0% and 1 psig is 4.5%)  
**Supply Voltage:** 9 to 30 Vdc,  
Supply Current < 10 mA

0 to 5 Vdc Outputs		
Range	Output	Excitation*
5 to 1000 psia	0 to 5 Vdc	9 to 30 Vdc
1 to 10,000 psig	0 to 5 Vdc	9 to 30 Vdc
-15 to 30/50/100/150 psig	0 to 5 Vdc	9 to 30 Vdc
0 to -15 psig	0 to 5 Vdc	9 to 30 Vdc
-15 to 0 to +15 psig	-5 to 0 to +5 Vdc	9 to 30 Vdc

\* Supply Current < 10 mA

**Compensated Temperature:**  
-20 to 85°C ( $\leq 5$  psig/psia is 0 to 50°C)

Metric Versions of PX309 also available from Omega. Please see PXM309 series.



PX329-015G5V shown smaller than actual size.



To Order					
Range		1.5 m Cable Connection	mini DIN Connection	Twist-Lock Connection	M12 Connection
psi	bar				
Absolute Pressure					
0 to 5	0 to 0.34	PX309-005A5V	PX319-005A5V	PX329-005A5V	PX359-005A5V
0 to 15	0 to 1	PX309-015A5V	PX319-015A5V	PX329-015A5V	PX359-015A5V
0 to 30	0 to 2.1	PX309-030A5V	PX319-030A5V	PX329-030A5V	PX359-030A5V
0 to 50	0 to 3.4	PX309-050A5V	PX319-050A5V	PX329-050A5V	PX359-050A5V
0 to 100	0 to 6.9	PX309-100A5V	PX319-100A5V	PX329-100A5V	PX359-100A5V
0 to 200	0 to 14	PX309-200A5V	PX319-200A5V	PX329-200A5V	PX359-200A5V
0 to 300	0 to 21	PX309-300A5V	PX319-300A5V	PX329-300A5V	PX359-300A5V
0 to 500	0 to 34	PX309-500A5V	PX319-500A5V	PX329-500A5V	PX359-500A5V
0 to 1000	0 to 69	PX309-1KA5V	PX319-1KA5V	PX329-1KA5V	PX359-1KA5V
Gage Pressure					
0 to 1	0 to 0.07	PX309-001G5V	PX319-001G5V	PX329-001G5V	PX359-001G5V
0 to 2	0 to 0.14	PX309-002G5V	PX319-002G5V	PX329-002G5V	PX359-002G5V
0 to 5	0 to 0.34	PX309-005G5V	PX319-005G5V	PX329-005G5V	PX359-005G5V
0 to 15	0 to 1	PX309-015G5V	PX319-015G5V	PX329-015G5V	PX359-015G5V
0 to 30	0 to 2.1	PX309-030G5V	PX319-030G5V	PX329-030G5V	PX359-030G5V
0 to 50	0 to 3.4	PX309-050G5V	PX319-050G5V	PX329-050G5V	PX359-050G5V
0 to 100	0 to 6.9	PX309-100G5V	PX319-100G5V	PX329-100G5V	PX359-100G5V
0 to 150	0 to 10	PX309-150G5V	PX319-150G5V	PX329-150G5V	PX359-150G5V
0 to 200	0 to 14	PX309-200G5V	PX319-200G5V	PX329-200G5V	PX359-200G5V
0 to 300	0 to 21	PX309-300G5V	PX319-300G5V	PX329-300G5V	PX359-300G5V
0 to 500	0 to 34	PX309-500G5V	PX319-500G5V	PX329-500G5V	PX359-500G5V
0 to 1000	0 to 69	PX309-1KG5V	PX319-1KG5V	PX329-1KG5V	PX359-1KG5V
0 to 2000	0 to 138	PX309-2KG5V	PX319-2KG5V	PX329-2KG5V	PX359-2KG5V
0 to 3000	0 to 207	PX309-3KG5V	PX319-3KG5V	PX329-3KG5V	PX359-3KG5V
0 to 5000	0 to 345	PX309-5KG5V	PX319-5KG5V	PX329-5KG5V	PX359-5KG5V
0 to 7500	0 to 517	PX309-7.5KG5V	PX319-7.5KG5V	PX329-7.5KG5V	PX359-7.5KG5V
0 to 10,000	0 to 690	PX309-10KG5V	PX319-10KG5V	PX329-10KG5V	PX359-10KG5V
Vacuum and Compound Gage Pressure					
0 to -15	—	PX309-015V5V	PX319-015V5V	PX329-015V5V	PX359-015V5V
-15 to 0 to +15	—	PX309-015CG5V	PX319-015CG5V	PX329-015CG5V	PX359-015CG5V
-15 to 30	-1.03 to 2.1	PX309-V030G5V	PX319-V030G5V	PX329-V030G5V	PX359-V030G5V
-15 to 50	-1.03 to 3.4	PX309-V050G5V	PX319-V050G5V	PX329-V050G5V	PX359-V050G5V
-15 to 100	-1.03 to 6.9	PX309-V100G5V	PX319-V100G5V	PX329-V100G5V	PX359-V100G5V
-15 to 150	-1.03 to 10.3	PX309-V150G5V	PX319-V150G5V	PX329-V150G5V	PX359-V150G5V

Comes complete with 5-point NIST-traceable calibration.

**\*Notes:** 1. Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage.  
2. For alternative performance specifications to suit your application, contact Engineering.

**Ordering Examples:** PX309-100G5V, 100 psi gage pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and 1.5 m cable termination.

PX319-015A5V, 15 psi absolute pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and mini DIN termination.

PX329-3KG5V, 3000 psi gage pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and twist-lock 6 pin connector termination. Mating connector sold separately; order PT06V-10-6S-R. Consult Sales for OEM pricing.

# Annexe C : Fiche Technique capteur de pression hydraulique PX359-3KG-10V

## How to Order PX309 Series with 0 to 10 Vdc Output

0 to 10 Vdc Output  
0-1 to 0-10,000 psi  
0-70 mbar to 0-690 bar

### PX309 Series



**10V Output Specifications**  
(In Addition to Common Specifications on page 2)  
Total Error Band (Includes Linearity, Hysteresis, Repeatability, Thermal Hysteresis and Thermal Errors, Not Including Zero and Span Setting Accuracy):  $\pm 1.0\%$   
(5 psig/psia is  $\pm 1.5\%$ , 2 psig is 3.0% and 1 psig is 4.5%)  
**Supply Voltage:** 9 to 30 Vdc,  
Supply Current < 10 mA

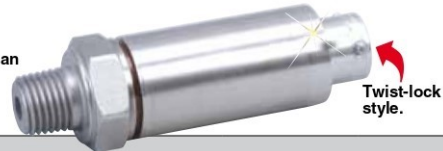
0 to 10 Vdc Outputs		
Range	Output	Excitation*
5 to 1000 psia	0 to 10 Vdc	9 to 30 Vdc
1 to 10,000 psig	0 to 10 Vdc	9 to 30 Vdc
-15 to 30/50/100/150 psig	0 to 10 Vdc	9 to 30 Vdc
0 to -15 psig	0 to 10 Vdc	9 to 30 Vdc
-15 to 0 to +15 psig	0 to 5 to +10 Vdc	9 to 30 Vdc

\* Supply Current < 10 mA

**Compensated Temperature:**  
-20 to 85°C ( $\leq 5$  psig/psia is 0 to 50°C)

Metric Versions of PX309 also available from Omega. Please see PXM309 series.

PX329-015G10V shown smaller than actual size.



Twist-lock style.

To Order					
Range		1.5 m Cable Connection	mini DIN Connection	Twist-Lock Connection	M12 Connection
psi	bar				
Absolute Pressure					
0 to 5	0 to 0.34	PX309-005A10V	PX319-005A10V	PX329-005A10V	PX359-005A10V
0 to 15	0 to 1	PX309-015A10V	PX319-015A10V	PX329-015A10V	PX359-015A10V
0 to 30	0 to 2.1	PX309-030A10V	PX319-030A10V	PX329-030A10V	PX359-030A10V
0 to 50	0 to 3.4	PX309-050A10V	PX319-050A10V	PX329-050A10V	PX359-050A10V
0 to 100	0 to 6.9	PX309-100A10V	PX319-100A10V	PX329-100A10V	PX359-100A10V
0 to 200	0 to 14	PX309-200A10V	PX319-200A10V	PX329-200A10V	PX359-200A10V
0 to 300	0 to 21	PX309-300A10V	PX319-300A10V	PX329-300A10V	PX359-300A10V
0 to 500	0 to 34	PX309-500A10V	PX319-500A10V	PX329-500A10V	PX359-500A10V
0 to 1000	0 to 69	PX309-1KA10V	PX319-1KA10V	PX329-1KA10V	PX359-1KA10V
Gage Pressure					
0 to 1	0 to 0.07	PX309-001G10V	PX319-001G10V	PX329-001G10V	PX359-001G10V
0 to 2	0 to 0.14	PX309-002G10V	PX319-002G10V	PX329-002G10V	PX359-002G10V
0 to 5	0 to 0.34	PX309-005G10V	PX319-005G10V	PX329-005G10V	PX359-005G10V
0 to 15	0 to 1	PX309-015G10V	PX319-015G10V	PX329-015G10V	PX359-015G10V
0 to 30	0 to 2.1	PX309-030G10V	PX319-030G10V	PX329-030G10V	PX359-030G10V
0 to 50	0 to 3.4	PX309-050G10V	PX319-050G10V	PX329-050G10V	PX359-050G10V
0 to 100	0 to 6.9	PX309-100G10V	PX319-100G10V	PX329-100G10V	PX359-100G10V
0 to 150	0 to 10	PX309-150G10V	PX319-150G10V	PX329-150G10V	PX359-150G10V
0 to 200	0 to 14	PX309-200G10V	PX319-200G10V	PX329-200G10V	PX359-200G10V
0 to 300	0 to 21	PX309-300G10V	PX319-300G10V	PX329-300G10V	PX359-300G10V
0 to 500	0 to 34	PX309-500G10V	PX319-500G10V	PX329-500G10V	PX359-500G10V
0 to 1000	0 to 69	PX309-1KG10V	PX319-1KG10V	PX329-1KG10V	PX359-1KG10V
0 to 2000	0 to 138	PX309-2KG10V	PX319-2KG10V	PX329-2KG10V	PX359-2KG10V
0 to 3000	0 to 207	PX309-3KG10V	PX319-3KG10V	PX329-3KG10V	PX359-3KG10V
0 to 5000	0 to 345	PX309-5KG10V	PX319-5KG10V	PX329-5KG10V	PX359-5KG10V
0 to 7500	0 to 517	PX309-7.5KG10V	PX319-7.5KG10V	PX329-7.5KG10V	PX359-7.5KG10V
0 to 10,000	0 to 690	PX309-10KG10V	PX319-10KG10V	PX329-10KG10V	PX359-10KG10V
Vacuum and Compound Gage Pressure					
0 to -15	—	PX309-015V10V	PX319-015V10V	PX329-015V10V	PX359-015V10V
-15 to 0 to +15	—	PX309-015CG10V	PX319-015CG10V	PX329-015CG10V	PX359-015CG10V
-15 to 30	-1.03 to 2.1	PX309-V030G10V	PX319-V030G10V	PX329-V030G10V	PX359-V030G10V
-15 to 50	-1.03 to 3.4	PX309-V050G10V	PX319-V050G10V	PX329-V050G10V	PX359-V050G10V
-15 to 100	-1.03 to 6.9	PX309-V100G10V	PX319-V100G10V	PX329-V100G10V	PX359-V100G10V
-15 to 150	-1.03 to 10.3	PX309-V150G10V	PX319-V150G10V	PX329-V150G10V	PX359-V150G10V

Comes complete with 5-point NIST-traceable calibration.

\*Notes: 1. Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage.  
2. For alternative performance specifications to suit your application, contact Engineering.

**Ordering Examples:** PX309-100G10V, 100 psi gage pressure transducer with 0 to 10 Vdc output and 1.5 m cable termination.

PX319-015A10V, 15 psi absolute pressure transducer with 0 to 10 Vdc output and mini DIN termination.

PX329-3KG10V, 3000 psi gage pressure transducer with 0 to 10 Vdc output and twist-lock 6 pin connector termination. Mating connector sold separately; order PT06V-10-6S-R. Consult Sales for OEM pricing.



## Annexe D : Fiche Technique PS-4D

# PRESSURE SNUBBERS

## NPT, BSPT, AND METRIC THREADS—PROTECT YOUR PRESSURE GAGE/TRANSDUCER FROM PRESSURE SPIKES AND WATERHAMMERS!

### PS-8 Series

- ✓ Dampens Pressure Spikes in the Process Fluid Before They Reach the Sensor
- ✓ Made of High-Grade Stainless Steel
- ✓ Maximum Pressure Rating Up to 10,000 psi (690 bar) for Liquids

If your system has pressure spikes, waterhammers, pressure pulsations from a pump, or rapid pressure changes, using a pressure snubber can significantly prolong the life of your sensors. A pressure snubber dampens the spikes and surges that, over time, will

#### Dimensions

SIZE	HEX FLATS		HEX LENGTH (APPROX)		THREAD LENGTH		OVERALL LENGTH	
	NPT	BSPT AND METRIC	NPT	BSPT AND METRIC	NPT	BSPT AND METRIC	NPT	BSPT AND METRIC
PS-8	5/8"	17 mm	2 1/32"	17 mm	1 7/32"	13 mm	1 13/16"	30 mm
PS-4	3/4"	19 mm	3 1/32"	25 mm	1 1/2"	13 mm	1 15/32"	37 mm
PS-2	1 1/4"	32 mm	1 1/4"	32 mm	2 9/32"	23 mm	2 5/32"	55 mm

cause a pressure gage or transducer to fail. The pressure snubber has a porous metal disk that protects your gage/transducer.

Easy to install, the snubber goes between the gage/transducer and the process. A pressure snubber should be used whenever there is a question about what type of pressure fluctuations a gage/transducer might experience. PS Series pressure snubbers will fit almost all industrial pressure gages and transducers.



### To Order

THREAD MODEL NO.	(M&F)	PORE OPENING mm (inch)		CAP. CFH AT 1-psi-DIFF. PRESS	FOR USE WITH
		MEAN	MAXIMUM		
NPT MODELS					
PS-8D	1/8 NPT	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-8E	1/8 NPT	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-8G	1/8 NPT	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PS-4D	1/4 NPT	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-4E	1/4 NPT	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-4G	1/4 NPT	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PS-2D	1/2 NPT	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-2E	1/2 NPT	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-2G	1/2 NPT	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
BSPT MODELS					
PS-8D-M	1/8-28 BSPT	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-8E-M	1/8-28 BSPT	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-8G-M	1/8-28 BSPT	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PS-4D-M	1/4-19 BSPT	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-4E-M	1/4-19 BSPT	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-4G-M	1/4-19 BSPT	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PS-2D-M	1/2-14 BSPT	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-2E-M	1/2-14 BSPT	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-2G-M	1/2-14 BSPT	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PARALLEL METRIC MODELS					
PS-8D-MG	1/8-28 G	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-8E-MG	1/8-28 G	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-8G-MG	1/8-28 G	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PS-4D-MG	1/4-19 G	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-4E-MG	1/4-19 G	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-4G-MG	1/4-19 G	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases
PS-2D-MG	1/2-14 G	0.064 (0.0025)	0.127 (0.005)	6.5	Oil 225 to 500 SSU (10 to 50 SAE)
PS-2E-MG	1/2-14 G	0.033 (0.0013)	0.064 (0.0025)	3.0	Water and light oil 30 to 225 SSU
PS-2G-MG	1/2-14 G	0.010 (0.0004)	0.0025 (0.0009)	1.1	Air, steam and gases

Ordering Examples: PS-8D-M, 1/8 x 1/8 BSPT snubber for oil.

PS-2E-MG, 1/2-14G x 1/2-14G parallel thread snubber for water.

## Annexe E : Fiche Technique pompe à main P42

### HAND PUMPS

P Series - Compact Steel

**SIMPLEX**



P82A, P41A & P22 Shown

Reservoir Capacity .....► 327.7 - 2195.9 cm<sup>3</sup>

Weight .....► 4.5 - 10.9 kg

Maximum Pressure .....► 700 bars

- Large 3/8" pressure port for maximum flow.
- Low handle effort for easy operation.
- Single and two speed models.
- Two-speed operation for fast and easy operation.
- Vent free reservoir eliminates spills (P41A).
- Chrome plated plunger and wiper system for durable, long lasting performance.

Hand Pumps



#### GAUGES - page 77

Improve your system visibility and safety by adding an inline hydraulic gauge to your circuit.



#### COUPLERS - pages 74 - 75

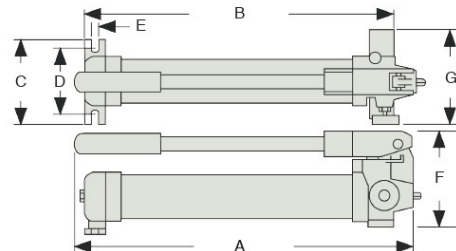
High flow quick disconnect couplers provide a quick change to a variety of pumps.



#### HOSES - pages 78 - 79

Heavy duty and thermo plastic hydraulic hoses to meet your requirements and safety factor.

With its compact footprint, the Simplex P22 hand pump is perfect for fixed mounting. ▼



Model	Speed	Pressure Rating (bar) Stages	Oil Volume Per Stroke (cm <sup>3</sup> )		Usable Oil Capacity (cm <sup>3</sup> )	A	B	C	D	E	F	G	Wgt. (kg)
			1st	2nd		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
P20	2	1st 14 2nd 197	12.9	2.6	327.7	361.4	281.4	66.5	38.1	15.0	142.0	136.9	4.5
P22	2	1st 14 2nd 700	3.8	1.0	327.7	361.4	281.4	66.5	38.1	15.0	128.5	125.0	4.5
P41A	1	700	----	2.6	655.5	585.0	464.3	133.4	---	---	119.1	101.6	5.9
P42	2	1st 14 2nd 700	12.9	2.6	737.4	651.3	529.8	89.9	---	---	146.1	136.9	8.6
P82A	2	1st 24 2nd 700	16.2	2.5	2195.9	558.0	495.3	146.1	120.9	7.9	174.8	177.8	10.9

www.tksimplex.com

## Annexe F :

### Tableau des données *Béton 2000* (2021)

Lieu (-)	N° Camion (-)	N° Mélange (-)	Volume (m <sup>3</sup> )	Affaissement Manuel		Pression à basse vitesse			Pression à haute vitesse			Affaissement Sonde (mm)
				Moyenne (mm)	Écart type (mm)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	
B2000	U	1	6	23.33	6.69	20202.00	16708.25	3.30	19946.00	15413.72	10.80	-
B2000	U	2	6	56.67	8.23	16040.00	12726.26	2.00	17322.00	12762.03	11.00	-
B2000	U	3	6	153.33	12.69	13283.00	9955.41	2.10	14821.00	10261.03	11.00	-
B2000	U	4	6	208.33	15.23	9553.00	6253.11	1.90	12659.00	8071.34	11.20	-
B2000	U	5	6	248.33	17.08	7449.00	3982.94	3.10	10579.00	6005.18	11.10	-
B2000	U	6	6	105.00	10.46	10084.00	6617.94	3.10	13241.00	8681.03	11.00	-
B2000	U	7	6	135.00	11.85	8886.00	5419.94	3.10	11534.00	6946.34	11.20	-
B2000	U	8	6	155.00	12.77	7740.00	4301.64	2.90	10717.00	6129.34	11.20	-
B2000	U	9	6	185.00	14.15	6331.00	2864.94	3.10	8859.00	4285.18	11.10	-
B2000	U	10	6	205.00	15.08	5396.00	1985.33	2.70	8121.00	3547.18	11.10	-
B2000	U	11	6	93.33	9.92	10052.00	6572.10	3.20	12221.00	7661.03	11.00	-
B2000	U	12	6	51.67	8.00	12210.00	8702.40	3.40	13865.00	9305.03	11.00	-
B2000	U	13	6	18.33	6.46	15472.00	12033.64	2.90	15924.00	11364.03	11.00	-
B2000	U	14	8	115.00	10.92	9992.00	6595.18	2.60	12201.00	7571.80	11.50	-
B2000	U	15	6	100.00	10.23	9692.00	6309.03	2.50	12469.00	7825.95	11.60	-
B2000	U	16	4	85.00	9.54	9066.00	5655.33	2.70	11551.00	6921.80	11.50	-
B2000	U	17	2	67.50	8.73	7485.00	3755.85	5.00	8800.00	4156.95	11.60	-

## Annexe G :

### Tableau des données *Béton Provincial Québec*

Lieu (-)	N° Camion (-)	N° Mélange (-)	Volume (m <sup>3</sup> )	Affaissement Manuel		Pression à basse vitesse			Pression à haute vitesse			Affaissement Sonde (mm)
				Moyenne (mm)	Écart type (mm)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	
BP QC	402	18	7	190.00	10.92	-	-	-	11215.00	6354.78	14.22	210
BP QC	402	19	7	170.00	10.31	6800.00	3803.16	2.60	12082.00	7226.59	14.19	195
BP QC	402	20	7.5	130.00	9.08	-	-	-	11746.00	6895.40	14.16	-
BP QC	402	21	3	210.00	11.54	-	-	-	9696.00	4819.74	14.32	230
BP QC	402	22	6	150.00	9.69	7820.00	3828.93	8.80	9920.00	5046.95	14.30	-
BP QC	402	23	8	87.50	9.65	-	-	-	13930.00	9072.99	14.20	-
BP QC	402	24	4	180.00	10.62	-	-	-	9900.00	5026.95	14.30	-
BP QC	402	25	6.6	85.00	9.54	-	-	-	12150.00	7297.80	14.17	95
BP QC	402	26	7.2	90.00	7.85	11934.00	9129.60	1.40	12725.00	7900.06	14.00	90
BP QC	402	27	7.2	155.00	9.85	7380.00	4319.02	3.00	10862.00	5996.97	14.25	185
BP QC	402	28	7.2	95.00	8.00	11911.00	9010.38	2.00	14000.00	9163.83	14.07	95
BP QC	402	29	6.75	155.00	9.85	7334.00	4305.09	2.80	11087.00	6225.18	14.23	165
BP QC	402	30	6.75	90.00	7.85	13578.00	10821.70	1.10	13137.00	8297.63	14.09	80
BP QC	402	31	6.75	150.00	9.69	-	-	-	10960.00	6096.57	14.24	-
BP QC	402	32	6.75	120.00	8.77	9470.00	6489.20	2.50	13571.00	8730.02	14.10	130
BP QC	402	33	6.75	220.00	11.85	-	-	-	11328.00	6467.78	14.22	185
BP QC	402	34	7	90.00	7.85	9630.00	6809.56	1.50	12540.00	7691.01	14.15	90
BP QC	402	35	7	230.00	12.15	-	-	-	9560.00	4690.16	14.28	210
BP QC	402	36	7	145.00	9.54	6563.00	3662.38	2.00	10541.00	5690.40	14.16	195
BP QC	402	37	7	250.00	12.77	3167.00	73.95	3.20	8410.00	3524.12	14.38	280
BP QC	402	38	6.25	165.00	10.15	-	-	-	11460.00	6601.38	14.21	-
BP QC	402	39	6.5	135.00	9.23	11067.00	8102.24	2.40	11371.00	6510.78	14.22	90
BP QC	402	40	6.75	55.00	6.77	12749.00	9704.06	2.90	13227.00	8386.02	14.10	90
BP QC	402	41	6.5	150.00	9.69	7100.00	4103.16	2.60	11237.00	6378.38	14.21	150
BP QC	402	42	6.75	140.00	9.38	7424.00	4427.16	2.60	11431.00	6573.99	14.20	135
BP QC	402	43	7	100.00	8.15	8172.00	5127.06	2.90	11705.00	6847.99	14.20	125
BP QC	402	44	6.75	50.00	6.62	12977.00	9996.20	2.50	14680.00	9822.99	14.20	85
BP QC	402	45	6.75	155.00	9.85	7329.00	4348.20	2.50	11164.00	6310.20	14.18	150
BP QC	402	46	5.25	70.00	7.23	-	-	-	13840.00	9000.63	14.09	75
BP QC	402	47	6.75	45.00	6.46	13086.00	10121.24	2.40	14700.00	9873.46	14.01	90
BP QC	402	48	6.75	145.00	9.54	6370.00	3325.06	2.90	10075.00	5211.57	14.24	190
BP QC	402	49	6.75	70.00	7.23	13330.00	10413.34	2.10	13147.00	8306.02	14.10	95
BP QC	402	50	6.75	135.00	9.23	7400.00	4435.24	2.40	11276.00	6420.59	14.19	155
BP QC	402	51	5	100.00	8.15	9500.00	6439.02	3.00	11300.00	6433.37	14.26	100
BP QC	402	52	5	175.00	10.46	6174.00	3161.13	2.70	9777.00	4895.93	14.35	180
BP QC	402	53	6	90.00	7.85	10740.00	7743.16	2.60	12140.00	7281.38	14.21	125
BP QC	402	54	6	195.00	11.08	-	-	-	9814.00	4937.74	14.32	-
BP QC	402	55	7	140.00	9.38	7799.00	4818.20	2.50	11170.00	6311.38	14.21	145
BP QC	402	56	7	135.00	9.23	6448.00	3499.27	2.30	10643.00	5779.57	14.24	140
BP QC	402	57	4.25	175.00	10.46	5380.00	2431.27	2.30	9316.00	4446.16	14.28	175
BP QC	402	58	4.25	135.00	9.23	7073.00	4028.06	2.90	10186.00	5308.14	14.33	130
BP QC	402	59	7.75	60.00	6.92	11451.00	8486.24	2.40	13615.00	8777.23	14.08	95
BP QC	402	60	7.75	125.00	8.92	8100.00	5135.24	2.40	11303.00	6447.59	14.19	125
BP QC	402	61	4	85.00	7.69	9553.00	6604.27	2.30	12955.00	8101.20	14.18	95
BP QC	402	62	4	165.00	10.15	6878.00	3945.31	2.20	11074.00	6208.97	14.25	145
BP QC	402	63	3.25	115.00	8.62	-	-	-	10174.00	5297.74	14.32	110
BP QC	402	64	2	160.00	10.00	-	-	-	6934.00	2056.14	14.33	155
BP QC	402	65	7.25	70.00	7.23	12644.00	9663.20	2.50	16013.00	11194.47	13.96	90
BP QC	402	66	5.75	80.00	7.54	-	-	-	15256.00	10431.06	14.00	-
BP QC	402	67	3.5	95.00	8.00	-	-	-	11491.00	6633.99	14.20	-

## Annexe H :

### Tableau des données *Béton Provincial Drummondville*

Lieu (-)	N° Camion (-)	N° Mélange (-)	Volume (m <sup>3</sup> )	Affaissement Manuel		Pression à basse vitesse			Pression à haute vitesse			Affaissement Sonde (mm)
				Moyenne (mm)	Écart type (mm)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	
BP DR	355	68	7.5	240.00	12.46	5162.00	2354.96	2.65	11224.00	6369.48	14.82	245
BP DR	354	69	7.75	240.00	12.46	4560.00	2173.37	1.84	11011.00	6387.34	14.17	230
BP DR	354	70	10	230.00	12.15	-	-	-	10973.00	6318.49	14.34	230
BP DR	354	71	8.25	250.00	12.77	4174.00	1809.14	1.72	11792.00	7137.49	14.34	255
BP DR	355	72	6.5	235.00	12.31	5940.00	3058.94	3.09	11578.00	6735.26	14.75	235
BP DR	355	73	12.25	235.00	12.31	5148.00	2298.90	2.90	11613.00	6751.75	14.86	230
BP DR	355	74	8.25	240.00	12.46	5259.00	2460.38	2.60	12529.00	7681.21	14.78	245
BP DR	355	75	8.25	230.00	12.15	5550.00	2748.01	2.62	11952.00	7100.85	14.80	220
BP DR	355	76	8.25	235.00	12.31	5582.00	2855.72	2.17	12711.00	7868.26	14.75	235
BP DR	355	77	7.5	215.00	11.69	5309.00	2409.43	3.20	11728.00	6871.80	14.83	225
BP DR	354	78	7.5	240.00	12.46	5523.00	2920.47	3.03	10964.00	6305.87	14.36	240
BP DR	354	79	8.25	235.00	12.31	4641.00	2141.88	2.46	10781.00	6122.87	14.36	210
BP DR	354	80	8	250.00	12.77	4815.00	2239.68	2.88	-	-	-	265
BP DR	354	81	7.75	240.00	12.46	5252.00	2825.45	2.06	11441.00	6782.87	14.36	225
BP DR	355	82	8.25	240.00	12.46	5603.00	2721.94	3.09	12674.00	7821.17	14.81	235
BP DR	355	83	8.25	220.00	11.85	6754.00	3427.10	5.74	12227.00	7369.12	14.84	235
BP DR	355	84	7.75	210.00	11.54	5725.00	2921.33	2.63	12448.00	7600.21	14.78	215
BP DR	355	85	9	225.00	12.00	5639.00	2781.49	2.95	11816.00	7037.19	14.37	215
BP DR	355	86	9	210.00	11.54	7167.00	3697.10	6.59	12104.00	7246.12	14.84	-
BP DR	355	87	8	235.00	12.31	4394.00	1692.96	2.02	11169.00	6306.07	14.87	245
BP DR	355	88	8	245.00	12.62	4815.00	1970.95	2.87	12218.00	7356.75	14.86	265
BP DR	355	89	7.5	235.00	12.31	4914.00	2186.04	2.18	11676.00	6816.44	14.85	235
BP DR	355	90	8.25	225.00	12.00	5025.00	2276.85	2.30	12542.00	7684.12	14.84	240
BP DR	355	91	11.25	230.00	12.15	6327.00	3442.57	3.11	13112.00	8259.17	14.81	220
BP DR	355	92	8.25	240.00	12.46	4774.00	1943.41	2.79	10625.00	5967.32	13.65	255
BP DR	355	93	8.25	235.00	12.31	5064.00	2240.14	2.75	11678.00	6811.71	14.89	225
BP DR	355	94	8.25	235.00	12.31	5418.00	2626.11	2.56	11900.00	7175.03	14.05	245
BP DR	355	95	6.75	235.00	12.31	4713.00	1954.75	2.36	11414.00	6557.80	14.83	285
BP DR	355	96	7	235.00	12.31	4790.00	1966.14	2.75	11391.00	6534.80	14.83	280
BP DR	355	97	8	225.00	12.00	5397.00	2633.71	2.39	12027.00	7241.46	14.41	-
BP DR	355	98	12	235.00	12.31	5856.70	2413.72	6.43	11272.00	6415.80	14.83	-
BP DR	355	99	8.25	250.00	12.77	4208.00	1523.78	1.92	12808.00	7955.17	14.81	-



## Annexe I :

### Tableau des données *Béton Provincial Québec (2024)*

Lieu (-)	N° Camion (-)	N° Mélange (-)	Volume (m <sup>3</sup> )	Affaissement Manuel		Pression à basse vitesse			Pression à haute vitesse			Affaissement Sonde (mm)
				Moyenne (mm)	Écart type (mm)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	Pression brute (kPa)	Pression nette (kPa)	Vitesse de rotation (RPM)	
BP QC	456	100	8	110.00	0.00	8962.90	6741.89	2.79	9228.17	5465.97	14.41	-
BP QC	456	101	8	80.00	0.00	10164.71	7874.71	3.31	10758.95	7009.36	14.31	-
BP QC	456	102	8	160.00	0.00	-	-	-	9468.75	5732.43	14.21	-
BP QC	456	103	8	115.00	0.00	7519.47	5305.10	2.74	10903.50	7151.25	14.33	-
BP QC	456	104	8	110.00	0.00	8200.51	5945.01	3.05	9128.42	5323.10	14.73	-
BP QC	456	105	8	150.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-
BP QC	456	106	8	115.00	0.00	12347.78	10027.26	3.54	12017.78	8280.39	14.22	-
BP QC	456	107	8	110.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-
BP QC	456	108	8	105.00	0.00	9427.93	7242.62	2.52	-	-	-	-
BP QC	456	109	8	110.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-
BP QC	456	110	8	115.00	0.00	9383.17	7241.78	2.19	10125.07	6551.95	12.98	-
BP QC	456	111	8	85.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-



## Annexe J :

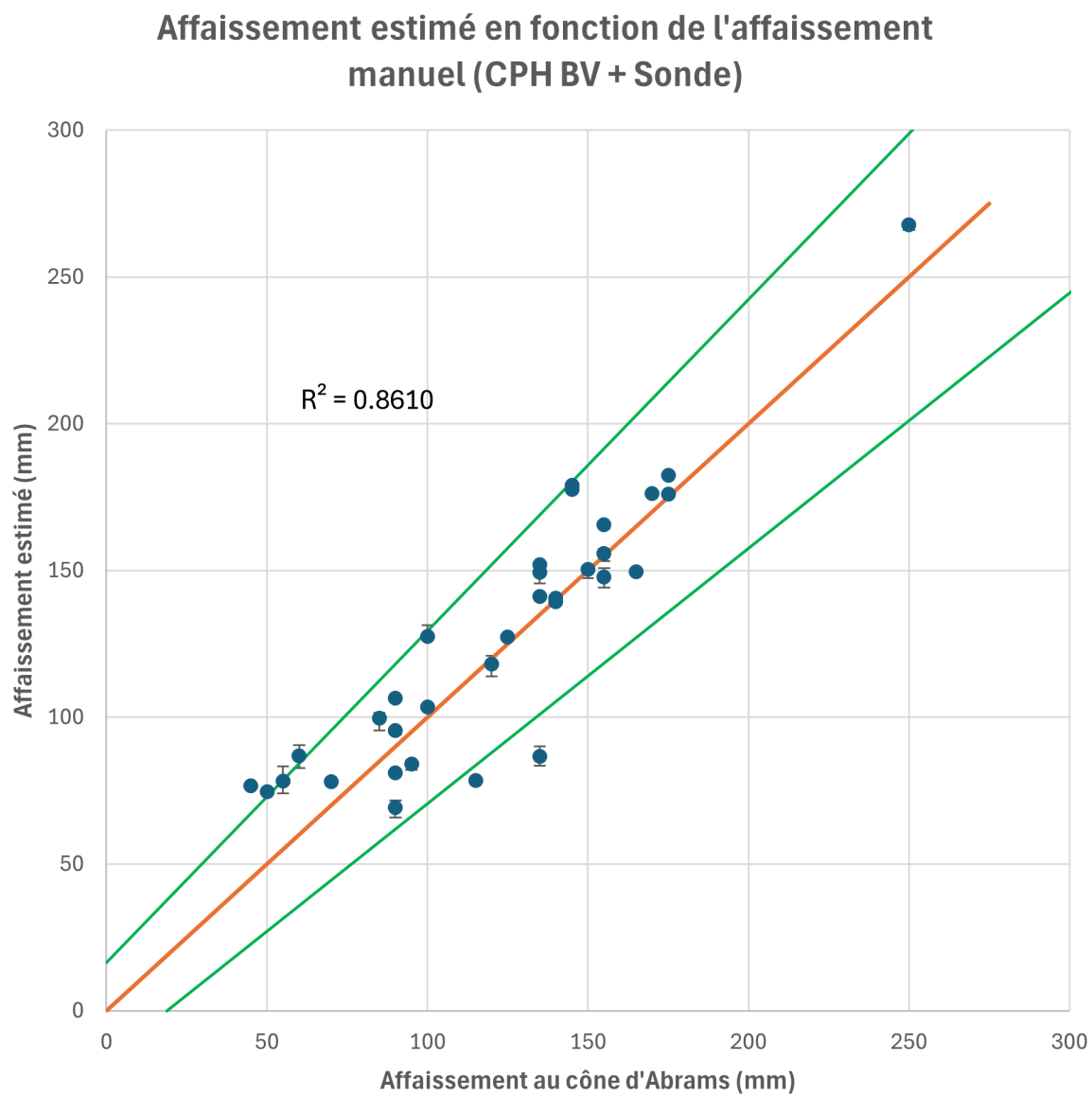


FIGURE 5.1