

Modélisation de l'écoulement du béton frais

Mémoire

Tristan Winnicki

Maîtrise en génie civil - avec mémoire Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Tristan Winnicki, 2023

Modélisation de l'écoulement du béton frais

Mémoire

Tristan Winnicki

Maîtrise en génie civil avec mémoire,

Maître des sciences (M.Sc.)

Sous la direction de : Marc Jolin, directeur de recherche Benoit Bissonnette, codirecteur de recherche

Résumé

Au vu de l'urgence climatique actuelle et des différents rapports scientifiques au sujet du dérèglement climatique, il est primordial et même vital de réduire drastiquement la pollution générée par l'Homme. Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) (2022) indique qu'il faut effectivement réduire de moitié les émissions d'ici 2030 et insiste fortement sur la nécessité d'agir immédiatement afin de préserver la planète.

Dans ce sens, l'industrie de la production de béton est responsable de 4 à 8% des rejets totaux humains de dioxyde de carbone et doit donc urgemment évoluer afin de réduire son impact environnemental. L'objectif principal de cette étude est de participer à cette transition industrielle en développant un modèle numérique fiable et exploitable afin d'optimiser la production, diminuer le temps de malaxage et réduire le gaspillage du béton à l'aide des outils technologiques de contrôle qualité déjà mis en place. En effet, développer une simulation numérique permettant de mieux comprendre le comportement et les profils d'écoulement du béton frais à l'intérieur d'une toupie de malaxage est extrêmement prometteur puisqu'elle permet alors d'encore mieux optimiser les temps et les coûts de malaxage. Afin d'espérer exploiter un tel outil numérique complexe, la mise en place de modèles élémentaires d'écoulement du béton frais est essentielle afin de valider, caractériser et calibrer les simulations numériques. Dans ce mémoire, le développement de trois modèles simples d'écoulement est traité et les résultats obtenus ont permis de valider le comportement numérique de l'écoulement du béton frais. Chacun de ces modèles présente des forces et faiblesses et participe à la création d'un environnement de travail numérique qui permet de beaucoup mieux appréhender la rhéologie et le comportement d'écoulement du béton frais. Ce projet de recherche est donc une véritable porte d'entrée vers la modélisation complète de la production du béton frais.

Mots clés: béton frais, rhéologie, modélisation numérique, camion-toupie, sonde rhéologique.

Abstract

In view of the current climate emergency and the various scientific reports on climate change, it is essential and even vital to drastically reduce man-made pollution. The latest IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report (2022) indicates that emissions must be halved by 2030 and strongly emphasizes the need to act immediately to preserve the planet.

In this sense, the concrete production industry is responsible for 4-8% of total human carbon dioxide emissions and therefore urgently needs to evolve to reduce its environmental impact. The main objective of this study is to participate in this industrial transition by developing a reliable and exploitable numerical model to optimize the production, reduce mixing time and also reduce concrete waste by using technological quality control tools already available. Indeed, developing a numerical simulation allowing to better understand the behavior and flow profiles of fresh concrete inside a mixing-truck is extremely promising as it allows for further optimization of mixing times and costs. In order to be able to exploit such a complex numerical tool, the implementation of elementary fresh concrete flow models is essential to validate, characterize and calibrate the numerical simulations. In this thesis, the development of three simple flow models is discussed and the results obtained are used to validate the numerical behavior of fresh concrete flow. Each of these models has strengths and weaknesses and contributes to the creation of a numerical working environment that provides a much better understanding of the rheology and flow behavior of fresh concrete. This research project is therefore a real gateway to a full modelling of fresh concrete production.

Key words: fresh concrete, rheology, numerical simulation, mixer-truck, rheological probe.

Table des matières

Résumé		ii
Abstract		iii
Table des ı	matières	iv
Liste des fi	gures	viii
Liste des ta	ableaux	xiv
Remerciem	nents	xvi
Introduction	n	1
Objecti	if de l'étude	3
Structu	ıre du document	5
Chapitre 1	: Revue bibliographique	7
1.1. Ca	aractérisation des bétons frais	7
1.2. Étu	ude rhéologique	8
1.2.1.	Caractérisation des fluides	8
1.2.2.	Modèle de Herschel-Bulkley	10
1.2.3.	Modèle de Bingham	11
1.3. Me	esures expérimentales de l'écoulement des bétons	12
1.3.1.	Essais d'affaissement au cône d'Abrams	12
1.3.2.	Essai d'affaissement modifié	14
1.3.3.	Essai à l'entonnoir	15
1.3.4.	Rhéomètres	16
1.4. Me	esure de la rhéologie à l'aide de capteurs embarqués	18
1.4.1.	Mesure de la puissance de malaxage	18
1.4.2.	Mesure de la force de traînée	19
1.5. Mé	écanismes d'usure	20

1.5	.1.	Usure abrasive	. 23
1.6.	Co	nclusion	. 26
Chapitre	e 2 :	Méthodologie	. 27
2.1.	La	mécanique des fluides appliquée au béton frais	. 27
2.1	.1.	Définition des forces hydrodynamiques	. 28
2.1	.2.	Méthode de distribution des pressions	. 31
2.1	.3.	Méthode du volume de contrôle	. 33
2.2.	Util	isation de modèles numériques	. 35
2.2	.1.	Modèle de calcul avec maillage	. 36
2.2	.2.	Modèle de calcul sans maillage	. 39
2.2	.3.	Génération du maillage	. 41
2.2	.4.	Maillage imbriqué	. 42
2.2	.5.	Modélisation numérique du béton frais	. 43
2.3.	Ca	s 1: Fluide à vitesse variable autour de la sonde rhéologique	. 45
2.3	.1.	Modèle expérimental	. 46
2.3	.2.	Modèle numérique	. 46
2.4.	Ca	s 2: Écoulement du béton frais sur un plan incliné	. 47
2.4	.1.	Modèle expérimental	. 49
2.4	.2.	Modèle numérique	. 50
2.5.	Ca	s 3: Essai d'affaissement au cône d'Abrams	. 52
2.5	.1.	Modèle expérimental	. 53
2.5	.2.	Modèle numérique	. 54
2.6.	Со	nclusions	. 55
Chapitre	e 3 :	Modélisation de l'écoulement d'un fluide autour de la sonde rhéologi	que
- Cas 1			. 56

3.1.	Intr	oduction au modèle	. 56
3.2.	Me	sure de l'usure réelle	. 58
3.3.	Rep	présentation expérimentale	. 60
3.4.	Ana	alyse théorique	72
3.5.	Rés	sultats numériques	.73
3.5	.1.	Méthode de distribution des pressions	.75
3.5	.2.	Influence des paramètres physiques sur l'usure abrasive	. 82
3.5	.3.	Méthode du volume de contrôle	. 84
3.6.	Cor	mparaisons et conclusions	. 88
Chapitr	e 4 :	Modélisation de l'écoulement du béton frais sur plan incliné - Cas 2.	. 90
4.1.	Rés	sultats expérimentaux	. 90
4.1	.1.	Observations préliminaires	. 91
4.1	.2.	Captation vidéo	. 93
4.1	.3.	Comparaison d'un béton identique	103
4.1	.4.	Influence du soulèvement de la boîte de confinement	105
4.2.	Rés	sultats numériques	108
4.2	.1.	Identification des zones d'écoulement 1	111
4.3.	Cor	nclusions1	114
Chapitro d'affais:	e 5 sem	: Modélisation de l'écoulement du béton frais lors de l'es ent au cône d'Abrams - Cas 3	sai 116
5.1.	Rés	sultats expérimentaux	116
5.1	.1.	Protocole expérimental	117
5.1	.2.	Lien entre affaissement et seuil de cisaillement	118
5.1	.3.	Captation vidéo	124
5.1	.4.	Comparaison d'un béton identique	125

5.2. F	Résultats numériques 128
5.2.1	Lien entre affaissement et seuil de cisaillement
5.2.2	2. Comparaison d'un béton identique 132
5.3. (Conclusions et recommandations134
Conclusi	ons et ouverture
Atteinte	e des objectifs
Bilan d	les travaux
Poursu	uite de la recherche et axes d'amélioration138
Recom	nmandations
Bibliogra	phie
Annexe A	A : Protocole expérimental de l'essai d'affaissement 152
Annexe E	B : Relations théoriques entre l'affaissement et le seuil de cisaillement. 153
Annexe (C : Fiche technique Eucon 37 15
Annexe [D : Fiche technique MasterSet® Delvo 15
Annexe I	E : Exemple de code en langage python permettant la récupération et le
traitemer	nt des données

Liste des figures

Figure 1-1: Courbe des différents comportements rhéologiques	10
Figure 1-2: Courbe de comportement rhéologique: Loi de Herschel-Bulkle	y 11
Figure 1-3: Représentation de l'essai d'affaissement	13
Figure 1-4: Essais d'affaissement au cône d'Abrams modifié – Figure ada	otée
(Ferraris & de Larrard, 1998a; Kabagire, 2018)	14
Figure 1-5: Appareil V-Funnel	15
Figure 1-6: Image de gauche: rhéomètre IBB / Image de droite: rhéomètre	ICAR 17
Figure 1-7: Système et sonde IBB - Image adaptée des documents techni	ques de
Command Alkon	19
Figure 1-8: Phénomènes d'usure par abrasion à deux corps (gauche) et tr	ois corps
(droite)	
Figure 1-9: Type de contact Abrasion glissante (Stachowiak G., 2006)	
Figure 1-10: Interaction entre la particule abrasive et la surface d'un matér	riau
ductile	
Figure 1-11: Sonde rhéologique usée	
Figure 2-1: Modélisation de l'écoulement de l'eau au contact de la sonde	
rhéologique sur Flow3D Hydro©	
Figure 2-2 : Force de traînée sur un cylindre	
Figure 2-3: Description des forces de traînée	30
Figure 2-4: Surface de contrôle autour du cylindre - Figure adaptée (Brusc	chi et al.,
2003)	
Figure 2-5: Méthode des trapèzes: calcul numérique d'intégrales	33
Figure 2-6: Méthode de Volume de contrôle pour un cylindre 2D - Figure a	daptée
(Anderson, 1991)	
Figure 2-7: Fraction volumique de fluide par maille – Figure adaptée (Hirt	&
Nichols, 1981)	
Figure 2-8: Exemple de modélisation DEM (Barreto & Leak, 2020)	40
Figure 2-9: Maillage structuré (gauche) et maillage non structuré (droite) -	Figure
empruntée (Roques & School, 2006)	41

Figure 2-10: Maillage imbriqué autour de la sonde rhéologique du cas d'étude 1.43
Figure 2-11: Écoulement du fluide autour de la sonde rhéologique dans un
malaxeur rotatif45
Figure 2-12: Montage expérimental sur le malaxeur 20 litres; la sonde est fixe et
orientée vers le bas; la cive du malaxeur est alors mise en rotation
durant l'essai
Figure 2-13: Modélisation d'un écoulement uniforme et rectiligne autour de la
sonde
Figure 2-14: Schéma du plan incliné 48
Figure 2-15: Système expérimental du plan incliné50
Figure 2-16: Modélisation du plan incliné sur Flow 3D Hydro51
Figure 2-17: Forme initiale du béton pendant le test d'affaissement au cône
d'Abrams – Figure adaptée (Roussel, 2006)
Figure 2-18: Schéma organisationnel de l'essai d'affaissement
Figure 2-19: Essai d'affaissement au cône d'Abrams54
Figure 2-20: Maillage du cône d'Abrams 54
Figure 2-21: Modélisation du 1/4 du cône d'affaissement 55
Figure 3-1: Observation microscopique de sables quartziques anguleux (gauche)
et de grains de sable arrondis (droite) Image de Pierre Bédard,
Université Polytechnique de Montréal 57
Figure 3-2: Observation de l'usure prématurée, profil idéal à gauche et sonde usée
à droite
Figure 3-3: Zones d'intérêt de la sonde rhéologique58
Figure 3-4: Écart relatif du diamètre des zones d'intérêt de la sonde après 8 mois
d'utilisation observé sur 3 spécimens59
Figure 3-5: Sonde plastique 60
Figure 3-6: Prototype de montage (gauche) et montage expérimental final (droite)
Figure 3-7: Zones d'intérêts de la sonde en plastique 61
Figure 3-8: Évolution des écarts relatifs de diamètres à différentes hauteurs de la
sonde plastique62

Figure 3-9: Évolution de l'écart relatif de masse de la sonde plastique	63
Figure 3-10: Image de la sonde rhéologique après l'expérience: Face à	
l'écoulement (image de gauche), de côté (image du milieu) et en	
arrière de l'écoulement (image de droite)	64
Figure 3-11: Répartition des forces de pression autour de la sonde rhéologique.	64
Figure 3-12: Répartition des vecteurs de vitesse autour de la sonde rhéologique	65
Figure 3-13: Évolution de l'usure de la sonde plastique	66
Figure 3-14: Mise en place d'un quadrillage visuel	66
Figure 3-15: Contour du béton frais autour de la sonde rhéologique: Face à	
l'écoulement (image de gauche), de côté (image du milieu) et en	
arrière de l'écoulement (image de droite)	67
Figure 3-16: Zones de préférence d'écoulement sur la sonde rhéologique: Face a	à
l'écoulement (image de gauche), de côté (image du milieu) et en	
arrière de l'écoulement (image de droite)	67
Figure 3-17: Superposition des couches de peinture colorée	68
Figure 3-18: Image d'arrachement de la peinture après 5 minutes d'écoulement.	69
Figure 3-19: Zones d'usure de la sonde après 5h – Vue de face – avant et après	
traitement de l'image	70
Figure 3-20: Zones d'usure de la sonde après 5h – Vue de côté – avant et après	
traitement de l'image	70
Figure 3-21: Carte d'usure de la sonde	71
Figure 3-22: Coefficient de pression théorique exercé par l'écoulement d'un fluid	е
autour d'un cylindre	73
Figure 3-23: Modèle numérique sous Flow 3D Hydro - Écoulement fluide simple	
autour de la sonde rhéologique	74
Figure 3-24: Extraction des points d'intérêts sur le nuage de points	74
Figure 3-25: Répartition de pression autour de la sonde – Vitesse du fluide de 0.	4
m/s – Deux points de vue différents	76
Figure 3-26: Répartition de la vitesse autour de la sonde – Deux points de vue	
différents	77
Figure 3-27: Variation du coefficient de pression Cp	78

Figure 3-28: Répartition de pression autour du cylindre Figure extraite(Nakayama
& Boucher, 2000)
Figure 3-29: Mesure du coefficient à différentes hauteurs
Figure 3-30: Valeurs théoriques du coefficient de traînée d'un cylindre en fonction
de l'allongement de ce dernier - Figure extraite (Nakayama & Boucher,
2000)
Figure 3-31: Répartition du pourcentage de pression et de vitesse autour de la
sonde
Figure 3-32: Répartition du pourcentage d'usure autour de la sonde
Figure 3-33: Profils d'évolution de la vitesse d'écoulement
Figure 3-34: Évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance en x85
Figure 3-35: Évolution de la vitesse d'écoulement en aval de la sonde
Figure 3-36: Évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance en y
Figure 4-1: Comportement 'normal' d'étalement du béton frais sur le plan incliné 91
Figure 4-2: Comportements anormaux d'étalement du béton frais sur le plan incliné
Figure 4-3: Captation vidéo sur le plan incliné
Figure 4-4: Détection automatique de contour pour 4 pixels voisins
Figure 4-5: Détection automatique de contour en diagonale pour 8 pixels voisins 94
Figure 4-6: Application du filtre image
Figure 4-7: Algorithme de détection pour 4 pixels voisins appliqué à l'écoulement
du béton frais95
Figure 4-8: Algorithme de détection amélioré appliqué à l'écoulement du béton frais
Figure 4-9: Valeurs maximales pour la méthode BM – image adaptée de l'article
sur la fonction « pyextreme » de Python
Figure 4-10: Empreinte vue du haut du béton frais
Figure 4-11: Valeurs caractéristiques de l'écoulement sur plan incliné
Figure 4-12: Distance du front de progression en fonction de l'affaissement 99
Figure 4-13: Largeur maximale d'étalement en fonction de l'affaissement 100

Figure 4-14: Empreinte latérale du béton frais entre 0 et 0.8 seconde 10)1
Figure 4-15: Empreinte latérale du béton frais entre 1.0 et 2.0 secondes (suite de	
la Figure 4-14)10)2
Figure 4-16: Vue du haut de l'empreinte du béton frais10)2
Figure 4-17: Étalements de bétons similaires sur le plan incliné à 20° 10)4
Figure 4-18: Effet du soulèvement de la boîte de confinement pour deux bétons	
fluides10)6
Figure 4-19: Différence d'empreinte avant et après soulèvement de la boîte pour	
deux bétons fluides10)7
Figure 4-20: Évolution latérale du béton frais à 0, 0.2, 0.4 et 0.6 seconde 10)8
Figure 4-21: Première étape de propagation – Vue latérale)9
Figure 4-22: Deuxième étape de propagation – Vue latérale 10)9
Figure 4-23: Première étape de propagation – Vue du dessus 17	10
Figure 4-24: Deuxième étape de propagation – Vue du dessus 12	10
Figure 4-25: Vitesses d'écoulement axiales (haut) et radiales (bas) à t = 5.0 s 17	11
Figure 4-26: Zones d'écoulement du béton frais1	12
Figure 4-27: Comparaison des écoulements expérimentaux et numériques 17	13
Figure 5-1: Essais d'affaissement au cône d'Abrams1	17
Figure 5-2: Captation vidéo de l'essai d'affaissement1	18
Figure 5-3: Relation théorique entre l'affaissement et le seuil de cisaillement 17	19
Figure 5-4: Relation théorique entre l'affaissement adimensionnel et le seuil de	
cisaillement adimensionnel12	20
Figure 5-5: Relation adimensionnelle entre l'affaissement et le seuil de cisaillement	nt
 – données obtenues dans la littérature (Banfill et al., 2000; Ferraris et 	t
al., 2003)12	21
Figure 5-6: Relation adimensionnelle entre l'affaissement et le seuil de cisaillement	nt
 – campagne expérimentale menée sur le Rhéomètre ICAR12 	22
Figure 5-7: Comparaison des relations entre affaissement et seuil de cisaillement	
entre la campagne expérimentale et la théorie	23
Figure 5-8 : Comparaison de l'étalement d'un même béton 12	26

Figure 5-9: Simulation de l'écoulement de l'affaissement du béton avec un seuil	l de
cisaillement 210 Pa et une viscosité plastique de 110 Pa.s	129
Figure 5-10: Lien numérique entre l'affaissement et le seuil de cisaillement	
adimensionnel	131
Figure 5-11: Maillage et résultat du quart de cône d'Abrams	132
Figure 5-12: Comparaison de l'étalement numérique et expérimentale	133
Figure 6-1: Toupie de malaxage et sonde rhéologique modélisée	138
Figure 6-2: Camion de malaxage Béton Provincial équipé du système de sonde	;
rhéologique	139
Figure 6-3: Modèle simplifié de la toupie de malaxage	139
Figure 6-4: Changement de repère spatial	140
Figure 6-5: Modélisation d'un écoulement circulaire de la toupie sur Flow-3D	
Hydro©	141
Figure 6-6: Modélisation particulaire - (Hoornahad & Koenders, 2012)	143

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Longueurs normalisées de l'essai 52
Tableau 3-1: Coefficients de traînée à différentes vitesses d'écoulement à diamètre
identique
Tableau 3-2: Coefficients de traînée à différentes vitesses d'écoulement – Méthode
du volume de contrôle86
Tableau 4-1: Angle d'inclinaison optimal pour différentes valeurs d'affaissement. 92
Tableau 4-2: Caractéristiques des bétons utilisés 98
Tableau 4-3: Composition du béton utilisé 104
Tableau 4-4: Comparaison des différents écoulements pour un béton identique 105
Tableau 4-5: Comparaison de l'empreinte avant et après soulèvement de la boîte
Tableau 5-1: Tolérance de la norme CSA A23.1:19 en termes de valeur
d'affaissement 124
Tableau 5-2: Caractéristiques du béton testé
Tableau 5-3: Comparaison des résultats des différents affaissements 127
Tableau 5-4: Comparaison des résultats numériques et expérimentaux
Tableau B-1: Modèles de prédiction du taux de cisaillement τ_0 (Pa)(Kabagire,
2018)

"Rien dans la vie n'est à craindre, tout doit être compris. C'est maintenant le moment de comprendre d'avantage, afin de craindre moins." - Marie Curie

"We may not have much in common, you and I. Still, I consider you as a friend and I will give you an advice : Be Curious On Your Journey!" - Solanum, at the Sixth Location -Outer Wilds

Remerciements

Lorsque j'évoque mon projet de recherche avec des personnes extérieures, la première chose qui me vient en tête a été la liberté et la confiance presque aveugle accordée par les personnes avec qui j'ai pu travailler. Pendant ces deux années, j'ai pu évoluer dans un environnement extrêmement propice au travail et très bienveillant, permettant ainsi de m'épanouir pleinement. Je tiens à remercier pour cela, mon directeur de recherche, Marc Jolin qui m'a accordé sa confiance dès les premiers instants et qui a toujours été extrêmement présent, personnellement et professionnellement. Tu as toujours été très à l'écoute, compréhensif et d'une très grande aide à partir du moment où on s'est rencontrés. Merci beaucoup, Marc, pour la qualité de travail, de vie ainsi que les opportunités de carrière que tu proposes à tes étudiants et tes chercheurs pendant leur parcours. Un directeur comme toi, il n'y en a pas beaucoup...

Je remercie aussi les « anciens » membres du bureau: Julien, Denis, Yannick, Sophie-Isabelle pour les parties de spikeball enflammées ainsi que tous les bons moments passés, mais aussi les membres les plus « récents »: Jongbeom, Aimerick, Maxime et Maxime pour le vent de fraicheur qui a suivi votre arrivée !

Merci à Jean Benoit, notre super professionnel de recherche, qui a toujours répondu présent en cas de besoin et a toujours fait son maximum pour assurer un travail dans les meilleures conditions possibles pour tout le monde. Ta présence, ton professionnalisme et ta bonne humeur sont primordiaux au bon fonctionnement du laboratoire et le seront encore longtemps.

Pierre, je te remercie tout particulièrement de m'avoir convaincu de rejoindre l'équipe de recherche et surtout de m'avoir très bien guidé pendant mes premiers mois à la maîtrise. Tu as été un excellent modèle, une grande source d'inspiration et tu as grandement participé à la réussite de ce projet tout en étant, à chaque instant, personnellement disponible. De plus, je tiens à remercier l'entreprise *Command Alkon* et tout particulièrement la branche québécoise a été essentielle à la réalisation de ce projet. Les différentes réunions et idées proposées par Denis Beaupré et

Maxim Morency ont toujours été très précieuses et pertinentes vis-à-vis de ce projet. La collaboration étroite entre l'industrie et l'université a été très enrichissante et m'a permis de développer de nombreuses compétences pluridisciplinaires. Merci encore une fois pour le dynamisme, la stimulation et la motivation apportée par l'équipe; particulièrement Denis qui « débordait » d'idées pertinentes à chaque réunion.

Je désire par ailleurs remercier les techniciens et tout le personnel lié au laboratoire de recherche de l'Université Laval qui permettent, jour après jour, aux différents étudiants et chercheurs de travailler dans les conditions les plus propices et sécuritaires possibles.

Merci à toi Lyne Dupuis, pour ta bonne humeur, ta joie de vivre et ton professionnalisme à toute épreuve. Ta présence est essentielle pour faire tourner le Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton et je te souhaite un très bon départ !

Pour conclure, je tiens aussi à remercier mes parents et ma famille qui m'ont soutenu tout au long de mes années d'étude et qui m'ont inculqué des valeurs de travail, de rigueur et de bienveillance qui me permettent d'être la personne que je suis aujourd'hui. Merci aussi de m'avoir accueilli sous le soleil chaud de la Guadeloupe pendant les vacances d'hiver pendant que la température à Québec était ...moins clémente... Finalement, merci à Inès de m'avoir toujours soutenu dans les bons comme dans les moins bons moments et de m'avoir rejoint dans cette belle aventure au Québec. À très vite à Montréal !

Introduction

En prenant la définition du béton comme le mélange d'un liant et de granulats, son usage remonte à la haute Antiquité (3 000 à 700 avant J.-C.) avec les mélanges à base d'argile en Mésopotamie notamment. Cependant, ce matériau se dégradant rapidement, peu de vestiges attestent de son utilisation. Le « véritable » béton, défini de nos jours par un mélange de ciment et de granulats, est utilisé dès l'époque romaine grâce à l'ajout de sables volcaniques de Pouzzoles ou de tuiles broyées. Selon Vitruve (Vitruve 15av. J.-C.), cet ajout permet aux mortiers de mieux résister à l'eau, d'offrir une meilleure prise et finalement d'obtenir une meilleure hydratation du béton frais, grâce aux silicates d'aluminium présents dans la pouzzolane. Les nombreux bâtiments de la Rome antique encore visibles témoignent de la résistance de ces constructions en béton: le Colisée ou bien le Panthéon de Rome en Italie sont de très bons exemples de longévité structurale. Au cours des dernières décennies, le béton s'est imposé comme le matériau le plus fiable et le plus répandu dans l'industrie de la construction. Mondialement, le ciment est la matière première la plus consommée, surpassant largement tous les autres matériaux. L'article rédigé sur la croissance relative mondiale d'utilisation des matières premières de 1970 à 2015 (Fischedick et al., 2014) en est l'exemple parfait. Cette vaste utilisation du ciment et du béton s'explique par son coût relativement faible, sa facilité d'emploi au chantier, ses performances et résistances mécaniques élevées ainsi que sa durabilité. Le béton est devenu aujourd'hui un matériau essentiel pour la construction des structures, des bâtiments, des ponts, des routes, des barrages, et de tous ouvrages en génie civil.

Bien que le béton soit principalement caractérisé à l'aide de ses propriétés physiques et mécaniques à l'état durci (résistance en compression, résistance au gel, perméabilité, porosité, etc.), la bonne connaissance des propriétés rhéologiques à l'état frais est essentielle à la réalisation d'une structure de béton. En effet, ces propriétés garantissent une certaine homogénéité structurale et une porosité minimale du béton frais. Par exemple, lors de sa fabrication, le béton passe par une phase liquide au cours de laquelle il est transporté et mis en place; si le béton ne

peut être placé correctement, les caractéristiques désirées à l'état durci ne seront jamais obtenues. Finalement, sa capacité à remplir adéquatement le coffrage permet de prévenir de nombreux problèmes tels que les infiltrations d'eau, les fissures ou encore les nids d'abeille. Les bonnes propriétés rhéologiques du béton à l'état frais sont donc essentielles pour une construction qui se veut la plus résistante et durable possible.

D'un autre côté, dans une optique d'optimisation de performance, de développement durable, mais aussi de diminution des coûts, les producteurs de béton souhaitent intégrer de plus en plus d'ajouts cimentaires ainsi que des granulats recyclés dans leurs formulations. Cela multiplie les défis posés aux producteurs de béton: difficulté de malaxage, perte d'homogénéité et fluctuation des propriétés rhéologiques. De plus, le développement relativement récent de nouveaux bétons (béton fibré, bétons à empreinte environnementale réduite, bétons autoplaçants, bétons pompables, etc.) impose des critères de conformités de plus en plus stricts. En parallèle, les outils de contrôles qualité n'ont pratiquement pas évolué et sont même parfois obsolètes dans certains cas. Par exemple, l'utilisation systématique de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, inventé au début des années 1900, et qui reste encore et toujours l'essai de référence en industrie et en chantier sans réelle évolution malgré l'introduction progressive de différents tests rhéologiques et physiques (air-mètre, rhéomètre, viscosimètre, etc.), montre bien la nécessité de faire évoluer les outils de mesure employés. De nombreux paramètres intrinsèques au béton (granulométrie, composition du mélange, types et tailles de grains utilisés, etc.), mais aussi les conditions météorologiques, les conditions de livraison (temps entre l'usine et le chantier) ou bien le plus souvent le facteur humain (ajustement des mélanges sur le site, ajout d'eau) sont des facteurs additionnels qui auront, encore une fois, un impact sur les propriétés rhéologiques du béton frais et de leur complexité.

La réduction de l'impact environnemental de la production du béton prêt à l'emploi est un des objectifs centraux de cette maîtrise. Les enjeux écologiques sont de nos jours fondamentaux et incontournables, et sont, dans le cadre de ce projet,

intimement liés aux enjeux économiques. Au Canada, l'industrie représente plus de 60 millions de tonnes de béton produites par an, pour un total de plus de 161 millions de dollars (Gouvernement du Canada, 2021). D'après ces chiffres très conséquents, l'optimisation, aussi minime soit-elle, peut engendrer d'énormes gains économiques et surtout environnementaux. Afin de répondre à ces défis, de nouveaux outils et procédures de contrôles du béton frais ont vu le jour pour moderniser et instrumenter l'industrie cimentaire (Amziane et al., 2006; Beaupre, 2012; Daczko, 2000; Sofiane Amziane et al., 2005). Ces équipements placés sur les bétonnières exploitent l'électronique embarquée et les technologies de communication en cherchant à rendre la production de béton plus robuste et plus flexible.

Objectif de l'étude

Ce projet de recherche vise à obtenir une meilleure compréhension de l'écoulement de béton frais autour d'une sonde rhéologique à l'*intérieur* d'une toupie de camion-malaxeur. L'objectif principal de cette recherche est donc de comprendre précisément le comportement du béton frais lors de son écoulement. Ce premier chapitre a pour but d'analyser les objectifs spécifiques de l'étude et d'en situer le contexte.

Le projet de recherche utilise comme support industriel le système embarqué pour bétonnière commercialisé par la compagnie *Command Alkon*. L'objectif principal de ce projet est de relier les résultats de différents essais d'écoulement réalisés expérimentalement sur du béton frais avec les modèles théoriques et surtout numériques mis en place. En prenant en compte des problèmes de dynamique des fluides complexes et des problèmes de modélisation numérique poussés afin de garantir une justesse scientifique (continuité du maillage, interactions aux limites, etc.), le modèle informatique sera un très bon outil de comparaison entre l'écoulement réel et théorique du béton dans le camion-toupie. En effet, les simulations numériques permettront d'identifier les lignes et les profils d'écoulement, de mieux comprendre le comportement du béton frais ainsi que d'expliquer les différents résultats obtenus lorsque le béton frais est mis en mouvement sous des conditions simples et élémentaires. Par exemple, l'écoulement

du béton frais lors de l'essai au cône d'Abrams ainsi que l'écoulement de ce même fluide en surface libre sur un plan incliné seront testés dans ce projet de recherche. De plus, l'écoulement d'un fluide élémentaire mis en mouvement autour de la sonde rhéologique est étudié afin de comprendre précisément les phénomènes d'usure s'appliquant sur la surface extérieure du capteur. Ces différentes expériences élémentaires permettent alors de tracer un parallèle entre les résultats observés réellement, théoriquement puis numériquement. Ces étapes sont essentielles pour qu'ultimement il soit possible de modéliser l'entièreté du mouvement du béton frais dans la toupie, en incluant particulièrement les effets de roulement mais aussi le mouvement avant-arrière imposé par les pales disposées dans la toupie.

Afin de répondre adéquatement aux défis proposés tout au long de ce projet de recherche, les différents objectifs spécifiques présentés ci-dessous doivent être traités:

- Comprendre en détail les phénomènes d'écoulement fluide autour de la sonde rhéologique;
- Comprendre et caractériser l'influence des paramètres physiques sur les phénomènes d'usure abrasive;
- Implémenter et exploiter les modèles numériques rigoureux d'écoulement du béton frais;
- Valider ces modèles numériques par comparaison avec les observations expérimentales et théoriques;
- Décrire le lien numérique, théorique et expérimental entre le seuil de cisaillement et l'affaissement d'un béton frais;
- Associer les différentes simulations entre elles afin d'établir les bases d'un modèle d'écoulement complexe et réaliste du béton frais;

Le logiciel de modélisation utilisé, Flow 3D-Hydro© est un outil spécialisé dans la modélisation et la simulation de dynamique des fluides (CFD - Computational Fluid *Dynamics*) et sera utilisé tout au long de ce projet. Il permet de mettre en place des modèles physiques complexes et d'en ressortir différents paramètres et données physiques qui évoluent avec le temps: pressions du fluide, forces appliquées sur le capteur, etc. Le choix d'utiliser un logiciel déjà développé et fiable permet de se concentrer uniquement sur l'élaboration de modèles et de leurs validations par comparaison avec la réalité et de s'affranchir des différents problèmes de calculs fondamentaux. La mise en place, l'utilisation et la validation de plusieurs modèles d'écoulement élémentaire du béton frais sont donc des étapes essentielles avant de développer un modèle plus complet. Il s'agit donc d'une porte d'entrée et d'un outil très important avant de pouvoir modéliser cet écoulement dans un milieu plus complexe, comme dans une toupie de malaxage. L'objectif ultime et l'ouverture proposée par ce projet de recherche est donc d'utiliser le système embarqué déployé de façon industrielle par Command Alkon à l'intérieur des toupies de malaxage et de s'en servir pour valider, raffiner et perfectionner un modèle numérique complexe qui a pour but de simuler l'écoulement de ce béton frais dans cette toupie.

Structure du document

Ce document a pour but de résumer les travaux de recherche réalisés tout au long de ce projet de maîtrise et tente de répondre aux différents objectifs spécifiques cités précédemment. Pour donner suite à cette introduction, la première partie, nommée revue bibliographique, situera historiquement le projet de recherche par rapport aux recherches scientifiques précédentes. La méthodologie, la description des équipements utilisés ainsi que les protocoles expérimentaux appliqués pour mener à bien les travaux de recherche seront présentés dans la deuxième partie. La troisième, quatrième ainsi que la cinquième partie montreront les résultats obtenus lors des différentes expériences et modèles réalisés, mais apporteront surtout les nombreuses conclusions et discussions qui peuvent être tirées de ces différentes travaux. Finalement, la dernière partie fera office de conclusion générale

de ce travail, mais aussi servira d'ouverture pour de futures perspectives de recherche, identifiées à l'aide de cette maîtrise.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Ce chapitre a pour objectif de présenter au lecteur les notions théoriques et générales concernant le béton frais dans le but de le préparer aux différents concepts abordés plus loin dans le mémoire.

1.1. Caractérisation des bétons frais

La qualité du béton frais est un des éléments clés dans la réalisation d'une structure ou d'un bâtiment qui se veut être économique, écologique, durable et performant. En effet, la capacité de ce béton à remplir adéquatement le coffrage tout en garantissant une homogénéité et une porosité minimale permet de prévenir de nombreux problèmes tels que les infiltrations d'eau, les fissures ou encore les nids d'abeille. Par conséquent, les propriétés rhéologiques du béton frais sont des éléments importants afin de produire des structures en béton qui répondent aux propriétés spécifiées. De plus, les propriétés du béton frais sont déterminantes en chantier puisqu'elles conditionnent la mise en place (choix de la technique de mise en place, choix du coffrage, choix des techniques de vibration et de finition, etc.). De manière qualitative, le béton se doit d'être maniable et doit être facile à mettre en place, à consolider, à finir pour les ouvriers et surtout être résistant à la ségrégation (Kosmatka, 2011). Des essais semi-empiriques visant à valider la qualité du béton livré sont utilisés au chantier de façon très courante puisqu'ils sont rapides, simples et économiques à réaliser, mais ont l'inconvénient de pas fournir tous les paramètres et propriétés du béton frais. D'un autre côté, les essais réalisés à l'aide de rhéomètres et d'outils adaptés à la caractérisation de l'écoulement sont majoritairement utilisés en laboratoire puisqu'ils sont souvent relativement lents et complexes à réaliser. Cependant, ces outils sont très utiles afin de caractériser adéquatement les propriétés rhéologiques du béton frais. Finalement, ces appareils de mesure sont souvent trop onéreux pour une utilisation régulière en chantier, mais sont essentiels au laboratoire afin de mieux comprendre l'écoulement du béton frais.

1.2. Étude rhéologique

Par définition, la rhéologie désigne l'étude de la déformation et de l'écoulement d'un fluide. L'observation préliminaire de l'écoulement et son analyse expérimentale permettent de développer un modèle rhéologique qui relie l'observation physique et les propriétés rhéologiques. Il s'agit alors d'un outil scientifique qui étudie les différents liens entre la viscosité, la plasticité et l'élasticité de la matière afin d'établir les différentes lois de comportement.

1.2.1. Caractérisation des fluides

Un fluide newtonien classique (eau, huile, gaz) est un fluide dont la loi de comportement entre la contrainte et le taux de déformation est linéaire. Ces fluides sont caractérisés par une viscosité dynamique indépendante des contraintes appliquées. La littérature scientifique détermine cette relation linéaire entre ces deux paramètres par l'équation suivante.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \tag{1.1}$$

Dans cette formule, τ représente la contrainte de cisaillement (en *Pa*), μ la viscosité plastique en (en *Pa.s*) et $\dot{\gamma}$, le taux de cisaillement (s^{-1}). Puisque le béton est un matériau hétérogène de par ses éléments constitutifs et qu'il se définit comme une suspension dense de particules de tailles diverses dans un fluide, la structure interne de la pâte de ciment est donc fortement dépendante du comportement de la suspension de ces constituants. La forte compacité du système entraîne de nombreuses interactions entre les grains et donc la création de forces de frottements qui s'opposent aux mouvements des grains (Poullain, 2003). Puisque dans un fluide newtonien, la viscosité est constante et indépendante du cisaillement appliqué (Caceres, 2019), le béton doit être qualifié de fluide non newtonien et viscoplastique. En effet, il ne s'écoule pas en dessous d'un certain seuil de contrainte et, sous certaines conditions, il existe de zones non cisaillées dans lesquelles la contrainte visqueuse n'est pas suffisante pour déformer le fluide. « *Si ces zones sont trop étendues, elles peuvent nuire au mélange dans la mesure où les éléments de fluide n'y sont ni étirés ni réorientés. De plus, les échanges avec les autres zones de*

l'écoulement sont contrariés » (Roussel & Coussot, 2005). Selon la littérature scientifique, les deux propriétés rhéologiques permettant la caractérisation de l'écoulement du béton frais sont le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Le seuil de cisaillement τ_0 (usuellement exprimé en Pa) peut se définir comme la contrainte de cisaillement qu'il faut appliquer au fluide afin de vaincre les frottements internes exercés entre les particules existantes afin d'amorcer son écoulement. Une fois ce seuil dépassé, les mouvements relatifs des grains et la circulation de la phase liquide dans la porosité intergranulaire mettent en mouvement le liquide étudié (El-Reedy, 2009). De façon pratique, ce seuil se manifeste par la contrainte de cisaillement qu'il faut appliquer pour provoquer la rotation de l'hélice d'un rhéomètre. D'un autre côté, la viscosité plastique μ (exprimée usuellement en *Pa*.*s*) représente la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse et peut être définie comme la mesure de la résistance à l'écoulement interne. Si une couche de fluide se déplace par rapport à une autre couche, une force doit être appliquée sur cette dernière afin de la déplacer par rapport à l'autre couche. Khayat (2008) rapporte que « cette force augmente si la friction (viscosité) de ce fluide augmente. ». Plus simplement, la viscosité plastique décrit la résistance à l'écoulement d'un fluide une fois que ce dernier est en mouvement et peut être comparée aux forces de friction, définies en dynamique des solides.

La littérature scientifique caractérise les fluides 'ordinaires' (incompressibles et homogènes) à l'aide d'essais et d'outils rhéologiques qui permettent de relier la contrainte avec la vitesse de cisaillement du liquide étudié. D'un point de vue expérimental, afin de pouvoir soumettre le béton à ces essais « *le béton ne doit pas ségréger durant l'écoulement et son volume doit rester le plus constant possible durant le cisaillement* » (De Larrard, 1999). Ainsi, le béton est un fluide viscoplastique qui ne peut pas s'écouler si la contrainte qui lui est appliquée n'est pas suffisante pour surpasser les forces de frottement internes. En dessous de ce seuil de cisaillement, le béton se comporte comme un solide et au-dessus il se comporte comme un fluide. Il a été montré expérimentalement que ce comportement particulier peut être décrit par une loi de Herschel Bulkley (Herschel & Bulkley, 1926)

ou de Bingham (Bingham, 1922). La Figure 1-1 résume les différences entre les différents modèles de fluides à l'aide des courbes contraintes-taux de cisaillement.



Figure 1-1: Courbe des différents comportements rhéologiques

1.2.2. Modèle de Herschel-Bulkley

De Larrard et al. (1998) ont montré dans leur étude que le comportement du béton frais pouvait corréler au modèle de Herschell-Bulkley: une loi de puissance (équation 1.2) entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation. Ce modèle permet alors de décrire les phénomènes non linéaires tels que la rhéofluidification ou le rhéoépaississement du béton frais sous cisaillement et se caractérise par une loi non linéaire à seuil.

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \tag{1.2}$$

Dans cette équation, τ représente la contrainte de cisaillement (*en Pa*), τ_0 le seuil de cisaillement (*en Pa*), K est l'indice de consistance, $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (*en s*⁻¹) et *n* est l'indice de puissance/de comportement. La Figure 1-2 présente les courbes contrainte-taux de cisaillement défini par ces hypothèses. Dans le cas d'un béton complexe, la loi d'Herschel-Bulkley permet de définir une viscosité apparente qui décroit avec le taux de cisaillement lorsque n est inférieur à 1 (fluide rhéofluidiant) et qui croit lorsque n est supérieur à 1 (fluide rhéoépaississant). Puisque ce modèle est une représentation complexe de la rhéologie du béton, une loi simplifiée peut

être obtenue en prenant un indice de comportement égal à 1. Dans ce cas de figure, l'indice de consistance *K* est remplacé par la viscosité du fluide (μ_{∞}) et l'équation 1.2 devient le modèle rhéologique de Bingham (équation 1.3).



Figure 1-2: Courbe de comportement rhéologique: Loi de Herschel-Bulkley

1.2.3. Modèle de Bingham

Comme expliqué précédemment, le modèle de Bingham est une expression simplifiée du modèle d'Herschel-Bulkley ($n = 1; K = \mu$) et constitue une approximation très acceptable pour décrire le comportement rhéologique d'un béton usuel. Il reste le modèle le plus utilisé en raison du faible nombre de paramètres à ajuster. Cette loi (équation 1.3) est dépendante de deux paramètres: le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité plastique du béton μ .

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \tag{1.3}$$

Dans cette relation τ représente la contrainte de cisaillement (*en Pa*), τ_0 le seuil de cisaillement (*en Pa*), μ la viscosité plastique (*en Pa.s*) et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (*en s*⁻¹). Dans ce cas de figure, l'écoulement ne se produit qu'à partir d'un certain seuil et est ensuite linaire. En d'autres termes, pour une valeur de contrainte

supérieure au seuil d'écoulement, la viscosité plastique est indépendante du taux de cisaillement et au-delà de ce seuil d'écoulement le fluide se comporte comme un fluide newtonien. Puisque cette étude va caractériser des bétons usuels de manière simplifiée, le modèle de Bingham semble plus adapté et plus simple à utiliser dans les nombreuses simulations numériques.

1.3. Mesures expérimentales de l'écoulement des bétons

Différents outils expérimentaux sont utilisés afin de caractériser le béton frais, définir son comportement d'écoulement et ses propriétés rhéologiques. Ces différents essais et appareils de mesures sont alors définis dans les paragraphes suivants.

1.3.1.Essais d'affaissement au cône d'Abrams

Afin de quantifier la consistance ainsi que les propriétés rhéologiques du béton, différents essais peuvent être réalisés. L'essai de référence pour les mesures industrielles de la consistance est la mesure d'affaissement ou d'étalement du béton frais au cône d'Abrams. Le cône d'Abrams est l'essai le plus répandu, car très facile, rapide et peu coûteux à réaliser au chantier. Il est constitué d'un cône vide et d'une plaque métallique et permet de déterminer l'ouvrabilité et la consistance d'un béton à l'aide de la mesure de son affaissement. La norme CSA A23.2-5C (2013) décrit précisément l'essai. Un résumé personnel de cette norme est présent à l'annexe A et formule les différentes étapes à suivre afin de réaliser correctement cet essai. La Figure 1 3 illustre le résultat et les différentes valeurs mesurées pendant l'essai.



Figure 1-3: Représentation de l'essai d'affaissement

Lorsque le cône est soulevé, le béton frais se met en mouvement et s'affaisse par l'action de la gravité. Comme vu précédemment, le béton s'arrête de s'écouler lorsque la contrainte de cisaillement appliquée devient inférieure au seuil de cisaillement τ_0 . Pour un béton traditionnel, il est démontré empiriquement qu'il existe une forte relation entre la valeur d'affaissement mesurée S et le seuil de cisaillement τ_0 . Cependant, Wallevik (2006) et beaucoup d'autres scientifiques affirment qu'il n'y a pas de lien fort entre l'affaissement et la viscosité plastique μ . Historiquement, Murata (1992) ont été les premiers à proposer une stratégie analytique qui repose sur un modèle d'équilibre des forces pour relier l'affaissement et le seuil de cisaillement. Leur formulation est uniquement représentative et acceptable pour des bétons ordinaires, de consistance moyenne. De nombreuses relations entre le seuil de cisaillement et l'affaissement ont ensuite été proposées dans la littérature scientifique afin de représenter différents types de bétons et en particulier plusieurs plages d'affaissement. Chaque modèle possède donc des forces et des faiblesses et est adapté au béton qu'il tente de représenter. Ces différents modèles et équations sont présentés à l'annexe B et sont des outils de comparaison très intéressants, notamment entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques. En effet, puisque ces équations permettent de prédire l'affaissement en fonction du seuil de cisaillement d'un béton, les modèles expérimentaux et numériques peuvent être comparés à la théorie et validés.

Bien que le seuil de cisaillement soit donc raisonnablement bien corrélé avec la valeur de l'affaissement mesurée au chantier, il en est autrement pour la viscosité plastique. L'existence de cette viscosité plastique explique pourquoi des bétons ayant le même affaissement peuvent se comporter différemment pendant leur mise en place. Puisque la prédiction de la viscosité plastique semble impossible avec l'essai au cône d'Abrams, il est légitime de se poser les questions suivantes : existe-t-il d'autres moyens expérimentaux simples pour évaluer les propriétés rhéologiques du béton frais ? Ces résultats peuvent être validés avec d'autres expériences et d'autres modèles numériques ? La réponse pourrait bien se trouver dans l'utilisation d'outils rhéologiques afin d'étayer ces propos, mais leur utilisation n'est cependant pas aussi répandue au chantier que l'essai au cône d'Abrams.

1.3.2. Essai d'affaissement modifié

Afin de répondre à la problématique soulevée précédemment, De Larrard et al. (1998a) se sont inspirés de la littérature scientifique afin d'imaginer un nouvel essai: l'essai au cône d'Abrams modifié. Ce dernier a pour but de relier la viscosité plastique à une propriété empirique du béton frais. Comme montré sur la Figure 1-4, une fine plaque d'acier est positionnée sur la surface du béton et va se déplacer tout au long de la tige centrale sur une hauteur maximale de 10 *cm*. Ce déplacement est chronométré et cette valeur donnera le *temps partiel d'affaissement*.



Figure 1-4: Essais d'affaissement au cône d'Abrams modifié – Figure adaptée (Ferraris & de Larrard, 1998a; Kabagire, 2018)

La viscosité plastique du béton frais est donc reliée à ce temps partiel d'affaissement puisqu'il est dépendant de la composition du mélange et de sa viscosité. Il est intéressant de constater que pour des bétons plus fluides (cas des bétons autoplaçants par exemple), l'erreur expérimentale liée à la mesure du temps d'affaissement est trop importante et cette relation n'est plus valide (Kabagire, 2018).

1.3.3.Essai à l'entonnoir

L'essai à l'entonnoir (*V-Funnel* en anglais) est un essai utilisé pour déterminer la capacité de remplissage (la fluidité) d'un béton. Lors de cet essai, le béton frais est placé dans un entonnoir en forme de « V », équipé dans sa partie basse d'une trappe qui peut être ouverte et fermée (Figure 1-5). Le temps nécessaire pour permettre au béton de s'écouler entièrement à travers la trappe ouverte permet de mesurer la consistance du béton. Emborg (1999) a élaboré une méthode pour mesurer le temps d'écoulement des bétons autoplaçants à l'aide de cet appareil de mesure. En effet, l'opérateur remplit entièrement l'entonnoir de béton frais et relève le temps mis par le fluide pour entièrement s'écouler à travers l'entonnoir, à partir du moment où la trappe d'évacuation est ouverte.



Figure 1-5: Appareil V-Funnel

Le document élaboré par *The Self-Compacting Concrete European Project* (2005) définit deux grandes classes d'écoulement à l'aide de cet outil. Lorsque le béton s'écoule en moins de 8 secondes, il appartient à la classe VF1 tandis que lorsque le l'écoulement se situe entre 8 et 25 s (au-dessus de 25 s, le test est arrêté), il appartient à la classe VF2. À titre comparatif, ce test est souvent effectué pour des bétons autoplaçants et le temps d'écoulement privilégié pour ce type de béton est entre 6 et 8 s. Les travaux réalisés par Mokéddem et al. (1999; 2014) montrent que ce temps d'écoulement à travers l'entonnoir peut être relié à la viscosité plastique.

1.3.4. Rhéomètres

Les rhéomètres sont des outils élaborés pour caractériser la rhéologie des bétons frais. Souvent mal adaptés aux conditions de chantier (difficulté de transport et d'utilisation notamment), leur utilisation est destinée à des mesures en laboratoire. L'appareil applique un cisaillement à l'échantillon de béton frais et permet d'étudier les propriétés d'écoulement d'un liquide à partir d'une force appliquée. Les valeurs obtenues grâce à ces appareils sont globales puisqu'elles correspondent à une réponse moyennée sur l'ensemble de l'échantillon. Tattersall (Tattersall & Banfill, 1983) a été le premier à proposer l'idée de mesurer le couple (relié à la contrainte de cisaillement) et la vitesse de rotation de la pale (reliée au taux de cisaillement) pour caractériser la rhéologie des bétons frais. Dans un graphique traçant alors le couple en fonction de la vitesse de rotation, la pente de la courbe est appelée H et le point d'interception avec l'axe des ordonnées est appelé G. À l'aide d'une régression linéaire ainsi que la détermination de l'ordonnée à l'origine de cette régression, les valeurs du seuil de cisaillement τ_0 et de la viscosité plastique η sont déterminées.

Par ailleurs, il existe une grande variété d'appareils qui ont été développés:

- Les rhéomètres à géométries simples du style agitateurs-malaxeurs (IBB, Icar, Two-point test),
- Les rhéomètres à cylindre coaxiaux (BML, Cemagref)
- Les rhéomètres plan-plan (BT-Rhéom.)

Des campagnes d'essais ayant pour objectif de comparer les résultats obtenus sur un total de 5 grandes familles de rhéomètres pour un même béton ont été réalisées par Ferraris et al. (2000; 2003). Les différences de mesure rhéologique entre les différents rhéomètres sont élevées, mais il existe une bonne corrélation pour le seuil de cisaillement alors que pour la viscosité ces corrélations s'avèrent moins intéressantes. Les résultats obtenus ont permis de montrer que pour un même béton et en passant par des unités fondamentales, les constantes de Bingham (i.e. le seuil de cisaillement et la viscosité plastique) sont différentes pour chaque appareil, mais une relation entre les valeurs produites par les différents rhéomètres (à plus de 95% de confiance) apparaît.

Cependant, ces différents appareils sont majoritairement employés en laboratoire, car ils sont peu pratiques et onéreux: ils sont donc très peu employés dans le cadre d'une exploitation industrielle.

Les ressources présentes au laboratoire de l'Université Laval ont permis de tester deux types de rhéomètres: le rhéomètre IBB et le rhéomètre ICAR présentés sur la Figure 1-6. Dans la suite du document, l'étude va donc logiquement se porter sur les résultats fournis par ces deux appareils.



Figure 1-6: Image de gauche: rhéomètre IBB / Image de droite: rhéomètre ICAR

Les différents appareils et essais normalisés évoqués ci-dessus sont des outils de comparaison très utiles dans le cadre de ce projet, car ils permettent de valider la simulation numérique, de relier la partie théorique et expérimentale et finalement de mieux comprendre le comportement d'écoulement du béton frais. En effet, la comparaison des résultats, l'observation puis la comparaison des profils d'écoulement et du comportement du béton frais dans divers environnements simples permettent de relier concrètement les modèles numériques, expérimentaux et théoriques. Finalement, l'utilisation expérimentale d'un rhéomètre permet de caractériser et déterminer les propriétés rhéologiques d'un béton frais et ainsi de faire le lien avec la simulation numérique.

1.4. Mesure de la rhéologie à l'aide de capteurs embarqués

Puisque les rhéomètres sont très peu utilisés en chantier, l'industrie de la production de béton a imaginé des outils de mesures rhéologiques embarqués plus facilement exploitables. Plusieurs méthodes sont utilisées, avec plus ou moins de succès, afin de mesurer les propriétés rhéologiques d'un béton frais à l'aide de capteurs embarqués. La mesure de la puissance consommée par la toupie lors du malaxage ainsi que la mesure de la force de traînée d'un corps extérieur en mouvement dans ce même béton frais en sont des exemples concrets.

1.4.1. Mesure de la puissance de malaxage

La mesure de la puissance consommée par la toupie ainsi que sa vitesse de rotation lors de l'opération de malaxage est une idée développée par Tattersall (1983). Puisque la pression hydraulique est reliée au mouvement du ou des pistons à l'intérieur du moteur, un travail est effectué (sur un intervalle de temps), ce qui signifie que la pression est liée à la puissance ou à la quantité de travail développée. Wallevik et al. (2020) ont effectué des campagnes d'essais ainsi que des simulations numériques de mesure de puissance moteur consommée par l'écoulement et ont obtenu des résultats très intéressants. Différentes équations reliant la puissance hydraulique du moteur avec le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du béton frais sont démontrées.
1.4.2. Mesure de la force de traînée

La sonde *Viscoprobe*©, développée dans un premier temps par Mokéddem (2014) est un système embarqué qui mesure la rhéologie des bétons dans un malaxeur à béton fixe. Le principe de fonctionnement de cet appareil suppose que la vitesse relative entre le déplacement de la sonde et l'écoulement du béton induit un effort sur le capteur qui se veut dépendant et complètement relatif des propriétés rhéologiques du fluide étudié. La sonde soumise au déplacement du béton frais va mesurer la force de traînée exercée par le fluide. C'est alors que la vitesse de déplacement de l'objet dans le fluide et la force de trainée sont explicitement reliées aux propriétés rhéologiques du béton frais. D'un point de vue physique, le problème peut s'exprimer par différentes équations reliant la force de traînée du béton à ses propriétés rhéologiques.

L'outil de caractérisation du béton frais, développé par *Command Alkon* et utilisé tout au long de ce projet de recherche, est une sonde rhéologique qui permet d'obtenir en continu les propriétés du béton frais à l'intérieur du camion-toupie. Ce capteur, développé par Beaupré (2012), permet aussi de mesurer la température du béton, les variations de mouvement de la toupie de malaxage (angle, vitesse et direction) et le volume de béton (voir Figure 1-7).



Figure 1-7: Système et sonde IBB - Image adaptée des documents techniques de Command Alkon

Ce système embarqué sur des camions-toupies reprend les mêmes hypothèses de force de traînée, mais transforme les résultats sous forme de pression afin de s'affranchir des phénomènes de taille et de forme de la sonde. En simplifiant les hypothèses de l'expression mathématique et en se ramenant à un fluide de Bingham, une relation simplifiée entre la force de traînée et les propriétés rhéologiques du béton frais peut être trouvée (Berger, 2023). Le premier avantage de ce système est qu'il ne demande pas d'échantillonnage de béton frais et permet donc de s'affranchir des erreurs de manipulation humaine (qui sont remarquables dans l'essai d'affaissement et avec le rhéomètre), mais aussi de ne pas gaspiller de béton lors des tests. L'outil proposé semble alors apte à caractériser l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques sans véritablement dépendre de l'expertise des chauffeurs et garantit alors une livraison de béton prêt à l'emploi de qualité. D'après la théorie, la relation entre la force de traînée générée par le déplacement de la sonde dans le béton frais et la vitesse de rotation de la toupie permet d'obtenir les informations rhéologiques désirées. D'après les documents techniques de Beaupré (2012), le système est capable de mesurer une valeur d'affaissement (suivant la norme ASTM C143) comprise entre 30 et 280 mm. Finalement, cette sonde est un outil particulièrement intéressant pour mieux comprendre le comportement du béton frais au contact de surfaces complexes. En effet, ce capteur permet d'obtenir des données intéressantes sur le béton (pression exercée par le fluide, densité, vitesse de rotation, etc.) lors de son évolution à l'intérieur de la toupie de malaxage. Il s'agit donc d'un appareil de mesure disposant d'un grand nombre de données expérimentales extrêmement utiles afin d'établir un lien entre l'écoulement réel du béton frais à l'intérieur d'une toupie de malaxage et les modèles numériques, expérimentaux et théoriques développés tout au long de ce projet de recherche.

1.5. Mécanismes d'usure

En parallèle à l'étude de l'écoulement du béton autour de la sonde, l'étude de la dégradation de la sonde à l'intérieur de la toupie de malaxage est d'un grand intérêt. En effet, depuis l'implantation des sondes dans les camions-toupies, la question de la durée de vie du système a toujours été une question centrale. La forme et la taille de l'objet, la taille, la dureté et la forme des granulats présents dans le béton frais, la vitesse de rotation et la pression qu'exerce le fluide sur la sonde sont des paramètres très influents sur la durée de vie totale de l'appareil, notamment vis-à-vis de son usure.

Le terme d'usure pour un matériau évoque en général la perte de matière et la dégradation des surfaces/pièces exposées à différentes charges et différents milieux agressifs. Le phénomène affecte bien souvent les équipements industriels et les rend avec le temps hors d'usage, du fait de la perte de leurs côtes fonctionnelles, de leurs dimensions originales et de leurs propriétés de surface. De nombreux secteurs industriels sont touchés: l'industrie minière, la sidérurgie, la fonderie, l'usinage, l'industrie automobile, la construction navale, etc. L'usure n'est pas uniquement dépendante des propriétés du matériau étudié, mais est la réponse du système à une multitude de paramètres. Le taux d'usure d'une surface peut varier en fonction des conditions de contact, telles que la pression de contact, la vitesse de glissement, la forme du contact, la rigidité de la suspension, l'environnement, le lubrifiant, etc., ce qui en fait un problème particulièrement complexe. De plus, ce taux d'usure peut aussi évoluer par répétition du contact entre les surfaces à vitesse et pression constante. L'usure mécanique est gouvernée principalement par des processus de déformation et de fracturation. Le processus de déformation joue un rôle important dans l'usure globale des matériaux ductiles tandis que le processus de fracturation joue un rôle important dans l'usure des matériaux fragiles (Stachowiak G., 2006). Les différentes formes d'usure définies ci-dessous et par la littérature possèdent une forme et une cause de détérioration distincte. D'après la littérature, chacune de ces dégradations peuvent se retrouver problématiques pour les systèmes mis en place si elles ne sont pas rigoureusement étudiées (Odabas, 2018; Pintaude, s. d.; Stachowiak G., 2006).

- Usure par frottement de deux surfaces dures
- Usure adhésive
- Usure par impact
- Usure par cavitation

Usure par érosion

Usure abrasive

Dans le cadre de ce projet, la sonde étant en acier, le matériau utilisé est donc ductile et l'usure principale se manifeste sous forme de déformation. Les deux types d'usure qui peuvent s'appliquer dans ce cas de figure sont l'usure par érosion et l'usure abrasive.

Dans le cas de figure de l'usure par érosion, la présence de particules fines (en particulier de grains fins et durs de forme irrégulière) est essentielle à ce phénomène puisque ces dernières frappent et/ou abrasent la surface étudiée à grande vitesse. Pour chaque contact entre ces deux éléments, les particules agissent comme un abrasif pendant un court temps et provoquent une usure abrasive partielle de la surface touchée. C'est alors qu'à vitesse élevée (plus de 20 m/s) après impact, le rebondissement de la particule emporte une partie de la surface supérieure de l'objet par mécanisme d'usure par adhérence. La répétition d'impacts de particules sur une même surface génère une usure par fatigue en introduisant des fissures dans la sous-surface: si la vitesse de l'impact est élevée, une fusion partielle de la surface peut aussi être générée. L'usure par érosion est donc une combinaison de différents mécanismes fondamentaux d'usure.

Pour des vitesses inférieures, l'usure par déformation plastique est négligeable et uniquement l'usure par fatigue se produit. Dans ce cas de figure, le phénomène prépondérant est l'usure par abrasion. Par définition, ce type d'usure se produit chaque fois qu'un objet solide est sollicité contre des particules d'un matériau d'une dureté relative. Ce phénomène peut s'observer même si le matériau qui s'écoule semble 'mou', car ce dernier peut transporter des particules dures. L'exemple choisit par Stachowiak (Stachowiak G.W., 1993) est l'usure observée sur les broyeurs de canne à sucre: la faible présence de grains de silices, très fins et durs, dans les fibres de la plante détériore grandement les outillages. Cependant, plusieurs mécanismes sont à dissocier et identifier dans le cas de l'usure abrasive et ces derniers agissent librement avec des caractéristiques différentes. Les mécanismes de l'usure par abrasion sont donc décrits plus précisément dans le paragraphe suivant.

1.5.1. Usure abrasive

Le mode d'usure semblant s'appliquer pour l'écoulement du béton frais (en particulier des particules fines comme le sable) autour de la sonde rhéologique est la dernière forme: l'usure abrasive. Elle est définie par la littérature (Bergeron, 1953; Franco Correa I.-D., 2019; Stachowiak G., 2006) comme l'arrachement de matière causé par le passage de particules dures (sable ou gravier pour le béton frais) qui glissent ou roulent sur une surface sous l'effet d'une pression externe. Deux types d'usure abrasive sont définis: l'usure à deux et à trois corps comme montrés sur la Figure 1-8. L'usure à deux corps survient quand des protubérances ou des particules solidement ancrées à la surface d'un matériau pénètrent et détériorent dans leur mouvement la surface d'un autre matériau. De l'autre côté, si les particules sont libres de rouler/glisser entre deux surfaces, l'abrasion est caractérisée comme une usure à trois corps.



Figure 1-8: Phénomènes d'usure par abrasion à deux corps (gauche) et trois corps (droite)

De plus, différents types d'usure abrasive existent et sont définis à l'aide de la tribologie. Le terme de tribologie est le terme technique utilisé pour décrire la compréhension des comportements et des performances des composants de machines et d'équipements dont les surfaces sont soumises à un mouvement relatif provenant d'autres composants ou de matériaux libres (Stachowiak G., 2006). Les mécanismes tribologiques mécaniques sont très complexes, car ils exercent leurs effets à plusieurs échelles: passant de la macro mécanique jusqu'à des phénomènes nano physiques. Dans notre cas de figure, puisque l'ensemble

granulaire exerce une pression sur la surface métallique de la sonde tout en se déplaçant, le type de contact sera donc qualifié d'abrasion glissante (Figure 1-9).



Figure 1-9: Type de contact Abrasion glissante (Stachowiak G., 2006)

Dans le cas d'un acier (matériau ductile), la particule abrasive qui pénètre la surface tout en se déplaçant fait apparaître deux types de phénomènes: le labourage et la coupe (Bergeron, 1953). La première interaction va accumuler de la matière à l'avant de la particule abrasive et va ensuite la répartir de part et d'autre du sillon formé (Figure 1-10). De l'autre côté, la matière déplacée par le grain abrasif se détache de la surface sous forme de copeaux. Grenier (1998) compare ce phénomène à une opération d'usinage avec un outil de coupe, mais à une échelle réduite.



Figure 1-10: Interaction entre la particule abrasive et la surface d'un matériau ductile

1.5.2. Usure de la sonde rhéologique

Tout au long de ce projet, la sonde étudiée est soumise à un milieu agressif: le béton. Ce dernier est constitué de particules fines (sable, pâte de ciment), plus grossières (gravier et granulats) et d'une couche liquide liant l'ensemble. À l'intérieur du camion-toupie, la sonde pénètre et ressort du béton à chaque fois que la toupie complète une rotation. La surface extérieure de la sonde est donc très souvent soumise à des vitesses et des pressions d'écoulement du béton variables, ce qui mène à l'usure de cette surface extérieure. Cette dégradation est particulièrement observée sur le site de *Wayne Davies Concrete* en Géorgie (voir Figure 1-11).



Figure 1-11: Sonde rhéologique usée

Une observation préliminaire des granulats utilisés sur ce site de production (en particulier les grains de sable) semble montrer que le béton produit à cet endroit est plus agressif et plus abrasif sur la sonde. Des essais vont donc être réalisés tout au long de ce projet afin de comprendre plus précisément les raisons de cette abrasion prématurée. En plus de l'évaluation des phénomènes d'usure, il s'agit surtout ici d'un moyen efficace de relier l'écoulement expérimental et numérique d'un fluide évoluant autour de la sonde. La modélisation précise des profils de vitesse et de pression exercés par le fluide autour de la sonde ainsi que la comparaison avec les données fournies par la sonde permettent de mieux comprendre le comportement d'un fluide au contact du capteur et finalement de mieux comprendre l'écoulement du béton frais au contact de surfaces complexes.

1.6. Conclusion

Afin d'apporter une conclusion à ce chapitre et à la lumière des notions abordées précédemment, la modélisation numérique de l'écoulement du béton frais et son lien avec les modèles théoriques et expérimentaux sont des sujets qui sont loin d'être triviaux. Les mécanismes qui caractérisent le béton frais, la nonhomogénéité de ce fluide et les différents paramètres rhéologiques qui régissent les lois de comportement à l'état frais de ce matériau rendent son écoulement complexe.

Les différents instruments et essais standardisés mentionnés précédemment sont donc des outils de comparaison essentiels, car ils permettent de valider la simulation numérique et de mieux comprendre le comportement du béton frais. Il sera, en effet, possible de relier les modèles numériques, expérimentaux et théoriques de manière concrète par la comparaison des résultats, l'observation et la comparaison des profils d'écoulement, ainsi que le comportement du béton frais dans différents environnements simples. De plus, les essais menés tout au long de ce projet permettent de mieux comprendre les phénomènes d'usure qui s'appliquent à la sonde, même s'il s'agit avant tout d'une méthode pour relier l'écoulement expérimental et numérique d'un fluide évoluant autour de la sonde. Une meilleure compréhension du comportement d'un fluide en contact avec le capteur et, à terme, une meilleure compréhension de l'écoulement du béton frais en contact avec des surfaces complexes, seront rendues possibles par la modélisation précise des profils de vitesse et de pression exercés par le fluide autour de la sonde ainsi que par la comparaison avec les données fournies par la sonde. Les prochains chapitres traiteront des différents essais et modèles élaborés en laboratoire, en chantier et numériquement et tenteront de comparer ces derniers et d'en tirer les conclusions les plus adaptées.

Chapitre 2 : Méthodologie

L'objectif principal de ce projet est de comprendre le comportement du béton frais dans différentes conditions élémentaires: écoulement en surface libre, autour d'un obstacle et, in fine, à l'intérieur d'une toupie. Au vu de la complexité de la tâche finale, il est extrêmement important de découper la recherche en plusieurs problèmes simples et élémentaires. Premièrement, afin de comprendre réellement l'écoulement du béton frais autour de la sonde rhéologique et relier les données obtenues par la sonde, les données théoriques et finalement les données numériques, une compréhension plus poussée du domaine de la dynamique et de la mécanique des fluides est nécessaire. Les prochains paragraphes vont donc tenter d'expliquer la théorie de l'écoulement du béton frais autour de la sonde et surtout la nécessité d'utiliser convenablement un logiciel de calcul de dynamique des fluides. Dans un second temps, la mise en place de modèles expérimentaux, théoriques et numériques de l'écoulement simple du béton frais sur un plan incliné et lors de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams a permis de comprendre précisément les profils et zones d'écoulements. Cette compréhension poussée et cette comparaison entre les parties théorique et expérimentale permet d'agrémenter et affiner le modèle numérique et ainsi le rendre le plus réaliste possible. Pour conclure, la multitude de modèles élémentaires permet de comprendre précisément le comportement du béton frais en conditions particulières et son écoulement dans divers cas de figure. Une fois reliés entre eux, ces modèles aident à évaluer le comportement complexe réel du béton frais et permettent d'espérer, dans de futurs projets, pouvoir simuler son écoulement à l'intérieur d'un camion-toupie.

2.1. La mécanique des fluides appliquée au béton frais

Afin de comprendre correctement l'écoulement d'un fluide autour d'un objet, il est essentiel de comprendre les propriétés imposées par les forces de traînée. Le comportement de l'écoulement d'un fluide autour d'un objet peut être étudié en combinant des données expérimentales et des hypothèses théoriques telles que la continuité du mouvement et la conservation de la quantité de mouvement. Le premier modèle numérique étudié (Figure 2-1), tente d'expliquer les effets de l'écoulement d'un fluide simple (eau) à travers et autour d'un cylindre (ou un objet plus complexe comme la sonde rhéologique). La forme cylindrique s'oppose alors au canal d'écoulement de l'eau obligeant le fluide à dévier de sa trajectoire d'origine. De plus, lorsque le fluide passe autour du cylindre, le profil de vitesse uniforme de l'écoulement se transforme en un profil non uniforme. Dans ce cas de figure, deux approches peuvent être utilisées pour déterminer la force appliquée sur le cylindre (B. R. Munson & Young, 2006; R. J. Cattolica, 2003): l'analyse de la surface de contrôle utilisant la répartition des données de pression autour du cylindre, et l'analyse du volume de contrôle utilisant des mesures de vitesse en amont et en aval du cylindre. Ces deux techniques permettent alors d'observer, d'analyser et de comparer l'écoulement du fluide autour de l'obstacle choisi, mais surtout de déterminer le coefficient de traînée de l'objet étudié. Le coefficient de traînée est une grandeur essentielle à déterminer puisqu'il représente la traînée et la résistance d'un objet dans un fluide. La méthodologie et les hypothèses de calcul sont définies dans les sections suivantes.



Figure 2-1: Modélisation de l'écoulement de l'eau au contact de la sonde rhéologique sur Flow3D Hydro©

2.1.1. Définition des forces hydrodynamiques

Afin de comprendre précisément les forces exercées par un fluide sur un obstacle rencontré, il est primordial de définir les notions élémentaires de dynamique

des fluides. Lorsqu'un corps est plongé dans un fluide, il est soumis à des pressions externes sur ses contours. L'effet global de ces pressions, dites hydrostatiques, au repos se ramène à la poussée d'Archimède, qui est égale et opposée au poids du fluide déplacé (Figure 2-2). Lorsque le fluide ou le corps est immobile, seule cette force liée à la gravitée est présente et régit le modèle.

Cependant, dans le cadre de l'écoulement d'un fluide autour d'un obstacle (ou le mouvement d'un objet à l'intérieur de ce même fluide), le liquide exerce des forces différentes: appelées forces hydrodynamiques. Ces forces peuvent se répartir en deux composantes. La première composante s'exerce selon l'axe d'écoulement, c'est la force de traînée, alors que la deuxième s'exerce perpendiculairement par rapport au mouvement, c'est la portance.



Direction du mouvement Direction de l'écoulement

Figure 2-2 : Force de traînée sur un cylindre

La traînée peut se définir comme la composante d'une force résistante qui s'oppose au mouvement de fluide et agit comme un frottement. Théoriquement, il s'agit donc de la composante des efforts exercés sur un corps, dans le sens opposé à la vélocité relative du fluide par rapport à l'obstacle (Figure 2-2). Par définition, la force de traînée se sépare en deux composantes distinctes: les contraintes ou forces de cisaillement des parois (appelées traînée de friction ou "*Skin Friction Drag*" en anglais) et les forces de pression (appelées traînée de pression ou "*Pressure Drag*" en anglais). D'un côté, les forces de cisaillements sont tangentes à la surface de l'objet et sont engendrées par les forces de friction et la viscosité du fluide. De l'autre côté, les forces de pression s'appliquent quant à elles perpendiculairement à la surface de l'objet et dépendent de la répartition de la pression sur son pourtour (Figure 2-3).



Figure 2-3: Description des forces de traînée

Il est admis que les forces de cisaillement sont plus importantes sur les objets profilés (exemple d'une aile d'avion) tandis que les forces de pression sont prédominantes pour des objets émoussés (cylindre, sphère ou cube). Afin de quantifier cette force de traînée, l'équation mathématique est adimensionnelle et le coefficient de traînée est communément utilisé pour la décrire.

Coefficient de trainée:
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A}$$
 (2.1)

Dans cette équation, F_D représente la force de traînée, ρ la densité du fluide, U la vitesse relative d'écoulement (en m/s) et A la surface de référence (m²).

De manière similaire, la pression dynamique du fluide peut être utilisée afin de définir la pression agissant sur chaque volume élémentaire d'un objet et ainsi obtenir le coefficient de pression global.

Coefficient de pression:
$$C_P = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2}$$
 (2.2)

Dans cette équation, Δp représente le gradient de pression.

Ces deux coefficients seront alors très utiles pour définir quantitativement les forces exercées sur l'objet des différents modèles décrits dans la suite de ce chapitre.

2.1.2. Méthode de distribution des pressions

La première méthode de calcul du coefficient de traînée approxime la force totale de traînée par une unique composante reliée à la pression du fluide sur la surface du cylindre. En d'autres termes, la traînée est assimilée uniquement aux forces de pression agissant perpendiculairement à la surface extérieure de la sonde. Il s'agit d'une approximation valide puisque la traînée sur un cylindre ou toute forme cylindrique est principalement induite par les forces de pression, car le cisaillement est négligeable (M. Munson et al., 2020). À l'aide de cette méthode, la force de pression du fluide sur l'obstacle est calculée par intégration de la répartition des pressions différentielles tout autour de la surface du cylindre (B. R. Munson & Young, 2006). La surface extérieure de la sonde est donc découpée en une multitude de surfaces élémentaires sur lesquelles sont exercées une partie de la force de pression totale. La géométrie imposée par les hypothèses de calcul est présentée sur la Figure 2-4.



Figure 2-4: Surface de contrôle autour du cylindre - Figure adaptée (Bruschi et al., 2003)

Chaque composante de pression agit dans une direction normale à la surface, opposée à l'écoulement et doit être projetée dans la direction du mouvement afin d'en déduire la pression globale exercée par le fluide sur le cylindre. Ces pressions, fonctions de la position et de l'angle d'incidence, sont intégrées selon la surface normale pour obtenir la force de traînée associée aux pressions différentielles.

$$F_{D,p} = \iint_{S} p(\theta) . \cos(\theta) . da$$
(2.3)

En remplaçant, dans l'équation précédente, les différentes hypothèses posées par l'équation 2.1, l'expression du coefficient de traînée peut s'exprimer naturellement en fonction du coefficient de pression et de la surface transversale *A* puisque le cylindre est considéré comme un objet émoussé.

$$C_D \approx C_{D,p} = \frac{\iint_S C_P \cdot \cos(\theta) \cdot da}{A}$$
(2.4)

La variable d'intégration peut alors être adaptée en fonction de l'angle d'incidence de chaque point de mesure θ . La variable intégrale de surface est alors remplacée par la longueur d'arc et la longueur associée: $da = \frac{D}{2}$. *b*. $d\theta$ (Bruschi et al., 2003). De plus, les deux termes définis précédemment peuvent être supprimés dans l'équation et au vu de l'écoulement symétrique entre le dessus et le dessous du cylindre, l'intégrale peut être uniquement calculée sur la moitié de la surface.

$$C_D \approx \int_0^{\pi} C_P \cdot \cos(\theta) \cdot dC_P \cdot \cos(\theta) \cdot da$$
(2.5)

Il est difficile de relever un nombre infinitésimal de points tout autour de la surface du cylindre, de facto la continuité de l'intégrale ne peut être respectée si l'équation précédente veut être appliquée au problème. Cependant, numériquement, une intégrale peut être approximée par l'aire de la courbe définissant la fonction sur un intervalle donné. L'intervalle est alors découpé en *n* sous-intervalles et sur chacun de ces intervalles des figures géométriques simples sont reconstruites. La somme des aires des figures élémentaires forme alors une approximation de l'aire recherchée et donc une estimation de la valeur du coefficient de traînée. La première méthode, appelée somme de Riemann, approxime la valeur de l'intégrale de la fonction par la limite de la somme de géométries élémentaires rectangulaires quand le nombre de sous-intervalles tend vers l'infini. Cependant, la méthode des trapèzes propose un meilleur compromis entre vitesse de calcul numérique et précision du

résultat, dans ce cas de figure. La méthode choisie revient donc à estimer l'intégrale d'une fonction comme l'intégrale de son interpolation linéaire par intervalles de différents trapèzes élémentaires (Figure 2-5).



Figure 2-5: Méthode des trapèzes: calcul numérique d'intégrales

En appliquant ces hypothèses au cas de figure étudié (ref. Figure 2-4), l'équation 2.6 permet donc d'obtenir le coefficient de traînée total en fonction du coefficient de traînée partiel.

$$C_D \approx \sum_{i=1}^n \frac{(C_{D,i+1} + C_{D,i})(\theta_{D,i+1} - \theta_{D,i})}{2}$$
(2.6)

$$C_{D,i} = C_{p,i} \cos(\theta_i) \tag{2.7}$$

Afin de comparer les résultats obtenus avec un modèle théorique, le coefficient de pression peut être représenté par l'équation 2.8 (Bruschi et al., 2003).

$$C_P = 1 - 4 * \sin^2(\theta)$$
 (2.8)

Finalement, ce premier modèle permet d'obtenir l'estimation du coefficient de pression et donc d'associer la force de traînée aux forces infinitésimales de pression.

2.1.3. Méthode du volume de contrôle

La méthode du volume de contrôle est une méthode alternative utilisée pour déterminer le coefficient de traînée. Elle permet d'obtenir la force intégrale du fluide à partir de l'intégration des variables d'écoulement à l'intérieur de volumes de contrôles entourant l'objet (Anderson, 1991). Concrètement, la force de traînée est calculée à l'aide de la loi de conservation de la quantité de mouvement. Deux volumes élémentaires de contrôle sont définis dans cette méthode. Le premier volume d'entrée (1) est situé en amont de l'obstacle tandis que le volume de sortie (2) est situé suffisamment éloigné en aval (Anderson, 1991; Bruschi et al., 2003; Sooraj et al., 2018; Van Oudheusden et al., 2007). La perte de vitesse du fluide entre les deux volumes permet alors d'obtenir une expression de la force de traînée totale sur l'objet étudié.

$$F_D = \iint_1 U_{1,\infty} \cdot \rho \cdot \overrightarrow{U_1(y)} \cdot d\vec{a} + \iint_2 U_{2,\infty} \cdot \rho \cdot \overrightarrow{U_2(y)} \cdot d\vec{a}$$
(2.9)

Les géométries ainsi que les volumes de contrôle utilisés dans ce modèle sont définis sur la Figure 2-6.



Figure 2-6: Méthode de Volume de contrôle pour un cylindre 2D - Figure adaptée (Anderson, 1991)

L'expression de la différence de vitesse entre les deux volumes de contrôle peut être utilisée afin de transformer l'équation précédente en intégrale simple. De plus, les hypothèses de conservation de masse sont utilisées pour obtenir l'équation 2.10 et l'équation 2.11. Finalement, l'épaisseur de déplacement peut être considérée nulle puisque les vitesses en amont et en aval sont égales (Bruschi et al., 2003).

$$U_{1,\infty} = U_{2,\infty} \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{h}\right) \tag{2.10}$$

$$\Delta \equiv \int_0^h \left(1 - \frac{U_2(y)}{U_{2,\infty}} \right) dy$$
(2.11)

L'utilisation des termes de pression dynamique: $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2$ et de vitesse de sortie normalisée: $\frac{U_2(y)}{U_{2,\infty}}$ ainsi que l'utilisation de la méthode numérique des trapèzes permettent d'exprimer les équations 2.12,2.13 et 2.14 qui sont les formules utilisées pour exprimer la force de traînée à l'aide de la méthode de contrôle de volume (R. J. Cattolica, 2003).

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{1,\infty}^2 \int_0^h \frac{U_2(y)}{U_{2,\infty}} \cdot 2 \left[1 - \frac{U_2(y)_i}{U_{2,\infty,i}} \right] dy$$
(2.12)

$$F_D \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{1,\infty}^2 \sum_{i=1}^n \frac{(F_{D,i+1} + F_{D,i})(y_{i+1} - y_i)}{2}$$
(2.13)

$$F_{D,i} = \frac{U_2(y)_i}{U_{2,\infty,i}} \cdot 2\left[1 - \frac{U_2(y)_i}{U_{2,\infty,i}}\right]$$
(2.14)

Cette deuxième méthode permettant de calculer la force de traînée du fluide sur la sonde est valide et permet d'obtenir une comparaison fiable entre les valeurs trouvées par les deux stratégies de calcul. Le coefficient de traînée, la répartition des pressions ainsi que la répartition du champ de vitesse autour de la sonde sont donc des éléments très importants dans la compréhension d'un écoulement et forment un lien parfait entre les données fournies par la sonde (forces de pression) et la partie théorique/numérique. Ces deux méthodes de calcul vont donc être employées dans les prochains modèles numériques qui sont décrits aux paragraphes suivants.

2.2. Utilisation de modèles numériques

Afin d'utiliser pleinement les technologies numériques actuelles et les appliquer dans le domaine rhéologique du béton frais, l'utilisation d'un logiciel de dynamique de fluide est nécessaire. La modélisation numérique de la dynamique des fluides (« *Computational Fluid Dynamics* » en anglais) est un domaine de la

physique décrivant toutes les méthodes numériques actuelles permettant d'étudier l'écoulement de fluides (liquides et gaz) dans un environnement donné. Dans le domaine de la recherche, l'utilisation de logiciels de modélisation est répandue puisqu'ils permettent d'avoir facilement accès à toutes les informations instantanées du fluide (vitesse, pression, concentration, etc.) pour chaque endroit du modèle sans nécessairement engager des coûts expérimentaux très élevés. Ces outils de calcul sont donc extrêmement précieux et permettent (à l'aide d'équations mathématiques complexes) de reproduire des écoulements qui se veulent réalistes et fidèles à la réalité. Plusieurs méthodes de modélisation sont employées dans la littérature scientifique et sont réparties en deux grandes familles: les stratégies de calcul avec maillage et sans maillage. Afin de modéliser de façon optimale les différentes problèmes posés, les prochaines sections tenteront de comparer les différentes solutions proposées et de sélectionner la plus adaptée.

2.2.1. Modèle de calcul avec maillage

Les stratégies de calcul utilisant des grilles ou des maillages ont été développées et régulièrement utilisées afin de simuler des problèmes mécaniques, mais aussi plus récemment des problèmes de dynamique des fluides. Différentes stratégies sont employées: la méthode par différences finies, la méthode par volumes finis et enfin la méthode par éléments finis. La solution s'obtient généralement par la discrétisation (division) d'un volume étudié en un maillage d'une multitude de petits éléments. Il s'agit d'un outil extrêmement utile et intéressant pour étudier l'écoulement et l'interaction d'un fluide (eau ou béton dans ce projet) sur et au contact de surfaces élémentaires. Il est, par conséquent, toujours dans le vif intérêt des scientifiques de l'étudier et de la faire progresser surtout lorsque le modèle numérique comporte de nombreux avantages par rapport à l'expérience réelle en laboratoire ou en chantier en termes de coût, de temps et de restrictions des modèles physiques. La méthode portant notre attention est la méthode des volumes finis (*Finite Volume Method* ou *FVM*) et plus précisément la méthode des Volume Of Fluid (VOF), qui est une adaptation de cette dernière. Elle est basée sur une technique de calcul eulérienne et est justement utilisée par le logiciel Flow-3D Hydro© qui sera le logiciel employé tout au long de ce projet. Cette stratégie de calcul employée dans des travaux de simulations d'écoulement des fluides dysphasiques et non miscibles a été premièrement introduite par Noh et Woodward (Noh & Woodward, 1976) puis répandue et diffusée par Hirt et Nichols (Hirt & Nichols, 1981). Il s'agit là d'une méthode eulérienne conservative et pratiquement exclusivement utilisée pour la discrétisation en volumes finis. De nos jours, ces méthodes sont très répandues pour des applications utilisant des fluides non newtoniens. Par exemple de nombreux travaux sur l'écoulement de laves torrentielles (Viccione et al., 2010) ou tous types de fluides hétérogènes présentant une rhéologie similaire au béton frais (Balmforth et al., 2002; Chi et al., 2021; Cochard & Ancey, 2009; Jeong et al., 2007; Nikitin et al., 2011) utilisent cette méthode lorsque le fluide évolue sur des surfaces élémentaires et au contact d'obstacles. Le principe de cette méthode (VOF) est donc d'analyser l'écoulement laminaire d'un milieu dysphasique sans échange entre les différentes phases. Chaque maille est alors décrite par la fraction volumique $\alpha_{vol.}$ du liquide étudié (le deuxième liquide en question est l'air). Une valeur comprise entre 0 et 1, où 1 représente une maille remplie entièrement de liquide et 0, une maille où le liquide est absent, est attribuée à chaque maille (Figure 2-7).

0, 98	0, 8	0, 3	0
1	1	0, 92	0, 3
1	1	1	0, 7
1	1	1	0, 8

Figure 2-7: Fraction volumique de fluide par maille – Figure adaptée (Hirt & Nichols, 1981)

Afin de valider les résultats des simulations effectuées sous *Flow-3D Hydro*©, les scientifiques les ont comparé avec les différentes expériences rapportées dans la littérature. La conclusion est que les simulations monofluides ont été souvent

utilisées pour simuler l'écoulement du béton frais pendant les essais (Chi et al., 2021; Roussel et al., 2007; Vasilic et al., 2019; Wallevik & Wallevik, 2020) et que cette méthode est valide. Cependant, le comportement lié au seuil de cisaillement du matériau et le déplacement en surface libre sont les deux défis numériques fondamentaux de ces simulations. D'un côté, les équations de Navier-Stokes sont fréquemment utilisées pour le calcul de la viscosité apparente du matériau afin de produire une solution numérique à ce problème, mais de l'autre côté, lorsque le taux de cisaillement (ou le taux de déformation en 3D) s'approche de zéro, la viscosité apparente de ce même fluide s'approche de l'infini. Ainsi, dans les zones où l'écoulement s'arrête ou débute, qui sont souvent les zones d'intérêt, il est vital d'éviter ce problème de détermination de l'état de déformation lorsque le fluide se situe en dessous de ce seuil de cisaillement. La simulation de fluides de Herschel Bulkley nécessite donc une définition claire des conditions aux limites puisque le béton frais, présentant une frontière libre mobile, est particulièrement délicat à simuler. C'est donc pour cela que les lois classiques d'écoulement de fluides Binghamiens doivent être adaptées dans les calculs effectués par le logiciel. Roussel et al. (2006; 2005), par exemple, modélise différents essais d'affaissements à l'aide des équations de calcul de dynamique des fluides de *Flow-3D*© et souligne l'importance de l'implémentation d'un critère de seuil de cisaillement tridimensionnel afin de décrire au mieux le comportement du béton frais. Des bétons avec des seuils de cisaillement compris entre 25 et 5500 Pascal ont été étudiés en utilisant un modèle élasto viscoplastique supposant un solide incompressible et élastique jusqu'à l'obtention de ce seuil de cisaillement et un fluide de Bingham au-delà ainsi que l'absence de glissement à la base. À l'aide de cette approche numérique, pour l'essai au petit cône d'Abrams et l'essai d'affaissement ASTM, une bonne corrélation entre les données numériques et expérimentales est démontrée. Les méthodes VOF présentent l'avantage principal d'assurer la conservation de la masse et de la quantité de mouvement de l'écoulement. Cependant, il est difficile de reconstruire avec précision la courbure de l'interface dans des géométries complexes et des grilles non structurées, en raison de la nature discontinue du champ de fraction volumique. Un large choix de lois de comportement autorisé par le logiciel permet

de modéliser de nombreux phénomènes complexes tels que la thixotropie. Cependant, le blocage des particules et la ségrégation ne peuvent être pris en compte dans ces modèles puisque le fluide est considéré comme homogène et sans particule. Finalement, cette méthode fonctionne bien dans le cadre de bétons fluides et de mortiers. En présence d'une phase granulaire forte, lorsque la concentration des particules granulaires est forte ou bien lorsque le rapport entre l'épaisseur du fluide et la taille des particules est trop faible (signifiant que les particules sont de grandes tailles), le modèle de calcul *VOF* semble montrer ses limites et s'éloigne de l'écoulement réel. Wallevik et al. (2019) synthétise bien les forces d'un tel modèle: le béton frais est simplifié par une phase homogène (qualifié de *continuum*) sans particule, ce qui a pour effet d'alléger les temps de calcul et permet d'observer à l'échelle macroscopique les différents tests et écoulements élémentaires d'un béton fluide.

2.2.2. Modèle de calcul sans maillage

D'un autre côté, des stratégies de modélisation sans maillage ont également été développées afin de simuler des écoulements non newtoniens. Parmi elles, sont notamment citées les méthodes dites par éléments discrets (Discrete Element *Method*, *DEM*) ou encore les approches de type *Smoothed-Particle Hydrodynamics*, notées SPH qui permettent de calculer le mouvement et l'effet d'un grand nombre de petites particules. Selon cette méthode, le fluide étudié est constitué d'un nombre fini d'éléments individuels (Figure 2-8). Le comportement macroscopique du matériau est lié aux interactions entre les éléments du matériau par une application répétitive associée de la loi du mouvement à chaque élément, et d'une loi de force déplacement à chaque contact (Barreto & Leak, 2020). En d'autres termes, cette méthode modélise le déplacement et l'interaction d'un grand nombre de particules, qui peuvent s'attacher ou se détacher entre elles. Le mouvement de chaque particule est alors déterminé par l'application de la deuxième loi de Newton. Les forces de contact entre les particules sont modélisées artificiellement par un ensemble de systèmes de masse-ressort, de points d'appui et d'articulations. À chaque cycle de calcul, la loi du mouvement est appliquée sur chaque élément pour

mettre à jour la vitesse et la position des particules tandis que la loi d'interaction est appliquée à chaque contact pour mettre à jour les forces et les moments d'interaction entre deux entités.



Figure 2-8: Exemple de modélisation DEM (Barreto & Leak, 2020)

La méthode DEM donne accès à la mésostructure, voir à la microstructure (à l'échelle des grains), et des contacts particulaires et permet donc d'étudier l'écoulement du béton frais dans son ensemble, mais surtout le déplacement individuel de ses composants. Les trajectoires de certaines particules dans le mélange peuvent être étudiées et ces données peuvent fournir des informations précieuses sur la ségrégation des particules en fonction de leur taille dans un schéma d'écoulement donné. Pour résumer, le béton frais est défini par un grand nombre de particules de différentes tailles et permet de tracer à l'échelle de la particule (échelle microscopique) les déplacements, les vitesses et les forces de chaque élément. Les étapes de mélange, d'entraînement/désentraînement d'air, de blocage de particules, de ségrégation ainsi que de sédimentation sont particulièrement observables. Cette méthode permet de modéliser des bétons avec de nombreuses phases granulaires ainsi que des tailles de particules élevées, mais augmente grandement le temps de calcul numérique et son coût associé. D'un autre côté, comme le dit Roussel (2007), d'un point de vue physique, l'approche DEM, utilisée dans le domaine du génie civil, peut être mise en doute, car elle n'a pas de signification physique directe. Il est en effet difficile de définir physiquement le contact direct entre des particules solides censées représenter la phase de mortier et des particules solides censées représenter les grains les plus grossiers. De plus, le logiciel Flow 3D Hydro© n'utilise pas cette stratégie de calcul et ne sera donc pas employé dans ce projet. Puisque l'étude se concentrera autour de bétons fluides avec des phases granulaires faibles, la méthode de calcul avec maillage est suffisante.

2.2.3. Génération du maillage

La génération d'un maillage (en 2 ou 3 dimensions) est une étape extrêmement importante pour un modèle numérique, car son influence sur la solution calculée ainsi que le coût alloué est majeure. Afin d'obtenir un résultat précis, robuste et signifiant, un maillage de bonne qualité est essentiel puisque sa qualité a un véritable impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Chaque maillage généré se base sur la géométrie de l'objet étudié, plus la géométrie est complexe, plus le maillage le sera également. Deux types de maillages se distinguent: le maillage structuré qui est généré en reproduisant automatiquement une seule et même maille élémentaire, ou bien l'approche de maille non structurée qui consiste à générer des mailles composées d'éléments de volume quelconque. Avec cette méthode, les cellules ont un nombre arbitraire de faces et chacune de ces faces est définie par un nombre quelconque de sommets. La Figure 2-9 représente les deux méthodes de maillage.



Figure 2-9: Maillage structuré (gauche) et maillage non structuré (droite) – Figure empruntée (Roques & School, 2006)

Le maillage structuré est particulièrement économique en ressource informatique puisqu'il présente un nombre de mailles inférieur par rapport à un maillage non structuré équivalent. De plus, lorsque l'écoulement est aligné avec le maillage, les risques d'erreurs numériques sont diminués. Dans ce projet, les éléments modélisés sont souvent élémentaires et peu complexes, le maillage structuré est donc plus adapté pour ces modèles. Le problème majeur soulevé par ce type de maillage est la difficulté à modéliser des objets circulaires ou sphériques puisque les mailles générées sont rectangulaires. Le dilemme entre précision des surfaces élémentaires et temps de calcul est alors central. Afin d'obtenir un modèle juste, la précision du maillage se doit d'être adaptée à chaque cas de figure tout en gardant à l'esprit le coût numérique d'une augmentation de précision. Chaque modèle développé dans ce projet sera donc étudié spécifiquement.

2.2.4. Maillage imbriqué

Chaque maillage étant unique, il se doit d'être valide, adapté et optimisé à chaque cas de figure. Les exigences des modèles sont parfois si spécifiques qu'ils nécessitent certaines techniques de maillage plus spécifiques. Par exemple, le maillage de problèmes multiéchelles est particulièrement problématique: l'échelle peut varier entre de grandes longueurs (de plusieurs mètres) et des longueurs beaucoup plus faibles (de l'ordre de quelques millimètres). La solution proposée par cette méthode est de générer un maillage global avec une précision faible et un maillage imbriqué avec une précision plus haute, autour des zones d'intérêts où l'étude doit être plus précise. Cependant, il faut adapter le maillage au problème afin de ne pas augmenter le temps de calcul et d'utiliser inutilement des ressources de calcul. Plusieurs problèmes multiéchelles ont été observés tout au long de ce projet et ont été étudiés individuellement afin d'obtenir le meilleur compromis entre temps de calcul et précision des solutions. À l'aide de cette méthode de maillage, la solution finale retenue est: une première résolution des équations faite sur une grille grossière puis les flux et les pressions sont reconstruits et analysés sur une grille plus fine (Figure 2-10).



Figure 2-10: Maillage imbriqué autour de la sonde rhéologique du cas d'étude 1

2.2.5. Modélisation numérique du béton frais

L'écoulement du béton, en particulier lors d'un essai d'affaissement ou d'étalement simple, peut être décrit comme un écoulement, en surface libre, d'un liquide non newtonien couplé d'un solide granulaire. La granulométrie étendue (tailles de particules allant de quelques nanomètres à quelques centimètres), son réversible comportement parfois (thixotropie) et irréversible (processus d'hydratation) rend le comportement du béton frais particulièrement complexe. De fait, cet écoulement est donc par définition transitoire puisqu'il est voué à s'arrêter. En simplifiant les hypothèses, la littérature scientifique définit le béton frais comme une suspension de particules à l'intérieur de la matrice cimentaire. De plus, dépendant de la simulation et des échelles étudiées, les différentes composantes du béton (liants, granulats fins et grossiers, particules de ciment, etc.) peuvent être considérées comme des particules uniques ou bien appartenant à la matrice. La finesse, la justesse et la précision du modèle sont donc des éléments à prendre en compte afin de choisir à partir de quelle taille la particule est considérée comme indépendante de la matrice. Les temps et coûts de calculs numériques doivent tout le temps être pris en compte dans le processus de décision afin de rendre le modèle réalisable. Mathématiquement et physiquement, cet écoulement peut être assimilé à un modèle eulérien (Katopodes, 2019; Němeček 2021): pour deux phases immiscibles qui sont dans notre cas le béton frais et l'air, les équations de conservation de la masse et de quantité de mouvement sont calculées individuellement dans chaque phase. Dans le cas simplifié de la *VOF*, une seule équation de conservation de la masse et de quantité de mouvement est calculée et la fraction volumique de fluide par maille est mesurée à tout instant. Avec cette méthode, le béton frais est qualifié comme un fluide homogène et est régi par une loi de Bingham. C'est alors que les équations de Navier-Stokes permettent de décrire le mouvement de ce fluide particulier. Le bilan des forces et des masses sur un volume élémentaire de fluide permet l'obtention d'une forme tensorielle qui est fréquemment utilisée pour exprimer la conservation de la masse. Ces dernières sont utilisées couramment en mécanique des fluides (aéronautique, météorologie, etc.) et de nombreux ouvrages portent sur leur écriture complète.

Comme évoqué dans les chapitres précédents, pour les bétons frais usuels, l'équation de matériau la plus couramment utilisée est l'équation de Bingham, qui suppose l'apparition d'un seuil de contrainte d'écoulement et d'un comportement linéaire lorsque les contraintes de cisaillement dépassent cette contrainte d'écoulement. De plus, l'écoulement est valide lorsque la couche de béton est peu profonde, que la plus petite dimension caractéristique de l'écoulement est supérieure à 5 fois la taille de la plus grosse particule et que les vitesses de déplacement du fluide correspondent à un nombre de Reynolds faible. Afin d'éviter l'indétermination apportée par le modèle numérique, Roussel (Roussel, 2006) propose de décomposer l'écoulement du béton frais en deux étapes: en dessous du seuil de cisaillement, le béton se comporte comme un solide incompressible et élastique tandis qu'au-dessus de ce seuil, il se comporte comme un fluide de Bingham. C'est ainsi qu'apparaît l'arrêt numérique du mouvement du fluide et permet l'analyse numérique du test d'affaissement et de l'écoulement sur plan incliné. Pour traduire numériquement cette hypothèse, le critère du seuil de cisaillement tridimensionnel évoqué précédemment est mis en place sur le logiciel.

44

2.3. Cas 1: Fluide à vitesse variable autour de la sonde rhéologique

Le premier cas à l'étude est l'écoulement d'un fluide homogène autour de la sonde rhéologique. Le protocole expérimental se base sur l'utilisation des données générées par les capteurs déployés en chantier, afin de reproduire expérimentalement le mouvement de la sonde dans un malaxeur rotatif rempli et finalement de modéliser numériquement ce problème. L'analyse de l'écoulement d'un fluide en mouvement autour de la sonde permet de comparer les résultats expérimentaux, théoriques et industriels et ainsi valider les hypothèses de calcul et de modèle numérique. Dans un premier temps, pour s'affranchir des différentes problématiques soulevées par des fluides complexes, l'eau sera le fluide étudié. Dans le cas plus complexe de l'écoulement du béton, le capteur étant grandement déployé dans les camions-toupies, il suffit alors d'utiliser l'importante base de données fournies par ces sondes afin de comparer les forces de pressions expérimentales et numériques. La Figure 2-11 représente le mouvement de la sonde rhéologique dans un malaxeur rotatif rempli de fluide. Cette première utilisation de cette première prise en main numérique permet de mieux comprendre le comportement du béton frais lorsqu'il s'écoule. Le calcul informatique du coefficient de trainée de la sonde, rendu possible grâce à ce modèle, permet alors de comparer la simulation avec la théorie et d'obtenir un lien direct avec la pression mesurée expérimentalement par la sonde. Le principe de cet essai est de valider le modèle numérique par comparaison avec l'écoulement observé expérimentalement.



Figure 2-11: Écoulement du fluide autour de la sonde rhéologique dans un malaxeur rotatif

2.3.1. Modèle expérimental

Le modèle expérimental se compose d'un malaxeur rotatif mobile de béton d'une capacité de 20L sur lequel est fixée la sonde rhéologique de *Command Alkon* (Figure 2-12). La sonde est connectée avec le système de traitement de données qui permet d'obtenir les valeurs de pression de traînée exercée par le fluide sur le capteur. L'expérience a été réalisée avec de l'eau, du sable et finalement du béton frais afin de voir si une corrélation existe ente le modèle numérique et physique.



Figure 2-12: Montage expérimental sur le malaxeur 20 litres; la sonde est fixe et orientée vers le bas; la cuve du malaxeur est alors mise en rotation durant l'essai

2.3.2. Modèle numérique

Le premier modèle numérique étudié analyse l'écoulement d'un fluide qui se déplace à différentes vitesses d'écoulement tout autour d'un cylindre élémentaire puis de la sonde. Puisque la taille des éléments étudiés et des zones d'intérêts est grandement irrégulière, variant de quelques centimètres à la surface de la sonde à un demi-mètre pour la hauteur du fluide en mouvement, la mise en place d'un maillage imbriqué est nécessaire. Le modèle est alors composé d'un premier maillage cubique grossier de $1 \times 1 \times 1 m$ et d'un maillage imbriqué raffiné de $0.125 \times 0.125 \times 0.125 m$ tout autour de la sonde (Figure 2-13). Le maillage grossier est rempli de fluide et ce dernier est mis en mouvement à des vitesses variables. La précision des mailles a été graduellement augmentée au cours du projet afin

d'obtenir le meilleur compromis entre temps de calcul et précision des résultats. De plus, de telles variations géométriques exigent que la variation de précision entre les deux grilles soit linéaire afin de réduire les erreurs liées au transfert de données entre les mailles.



Figure 2-13: Modélisation d'un écoulement uniforme et rectiligne autour de la sonde

Ce modèle permettra ainsi de comparer les résultats de mesure de pression et de vitesse obtenus à l'aide de la sonde rhéologique déployée par *Command Alkon*. La détermination du coefficient de trainée et du coefficient de pression permet, dans un premier temps, la validation des calculs numériques par rapport à la théorie mais permet aussi de comparer les forces de trainée simulées par rapport à celles réellement mesurées dans les toupies de malaxage. Finalement, la compréhension détaillée des phénomènes d'usure sur la surface externe de la sonde et en particulier l'influence de la pression et de la vitesse du fluide sur ces dégradation est rendu possible grâce à ce modèle.

2.4. Cas 2: Écoulement du béton frais sur un plan incliné

Ce second cas tente de mettre en lumière le comportement des fluides à seuil (dans ce projet, des bétons frais avec différentes plages de valeurs rhéologiques) sur un plan incliné. L'expérience consiste à la libération soudaine d'un volume fini de matériau sur une pente ou sur une surface horizontale. Ce volume évolue ainsi sur une surface libre. Initialement, le fluide est placé dans une boîte de confinement au sommet du plan incliné comme représenté à la Figure 2-14. En ouvrant la trappe, le fluide est alors libéré et s'écoule. Cet essai est idéal pour comprendre les écoulements qui dépendent du temps car les conditions de départ (volume du fluide, propriétés rhéologiques, densité) ainsi que les conditions limites (angle de pente, rugosité de la surface, topographie), peuvent être facilement modifiées et manipulées. Il est à noter qu'un éclairage puissant a été utilisé tout au long de ces expériences afin de minimiser les imprécisions de mesure engendrées par la captation vidéo.



Figure 2-14: Schéma du plan incliné

La donnée principale relevée sur cette expérience est la ligne de contact entre le béton frais et le plan incliné (montrée sur la figure précédente) ainsi que son évolution au cours du temps. La vitesse de l'ensemble du fluide ainsi que l'évolution de son étalement peuvent être tracées en fonction du temps et en fonction de la composition de l'échantillon étudié. Les récentes recherches scientifiques sur l'écoulement de fluides viscoplastiques sur un plan incliné ont indiqué que l'angle d'inclinaison est un facteur non négligeable (Chi et al., 2021). Par exemple, Cochard et al. (2009) ont étudié l'écoulement de gel de Carbopole (fluide viscoplastique pouvant être modélisé grâce à une relation d'Herschel Bulkley) sur un plan incliné situé entre 0 et 18° d'inclinaison. D'un autre côté, Chanson et al. (2006) ont mené une série d'expériences en laboratoire sur l'écoulement à 15° de suspension de bentonite afin d'en comprendre l'écoulement et de prédire la position frontale et la vitesse de ce fluide en fonction du temps. Pour conclure, en s'inspirant de la littérature scientifique, des angles compris entre 10 et 20° seront utilisés lors de cette série d'expérience afin de couvrir pleinement l'écoulement de bétons possédant des propriétés rhéologiques étendues. Cet intervalle d'angle d'inclinaison a aussi été testé personnellement en laboratoire et semble optimal pour des bétons fluides, dont l'affaissement se situe entre 190 et 250 mm.

2.4.1. Modèle expérimental

Comme montré sur la Figure 2-15, le système expérimental se compose d'un plan incliné, d'une boîte de confinement en bois munie d'une trappe d'ouverture latérale et finalement d'un fond quadrillé afin de vérifier que la lentille de la caméra utilisée pour la captation vidéo ne déforme pas l'espace. Premièrement, le béton frais est placé à l'intérieur de la boîte en 3 couches successives. Chaque couche est 'piquée' par une tige métallique 25 fois (comme pour l'essai d'affaissement). La trappe est ensuite ouverte instantanément afin de permettre au fluide de s'écouler et c'est ainsi que la captation vidéo commence. Il est intéressant de noter que pour des bétons trop visqueux et/ou possédant une faible valeur d'affaissement, une fine couche d'huile est appliquée sur les parois de la boîte et de la trappe afin d'éviter

toute adhérence du fluide. Le plan incliné mesure 120 cm de long, 110 cm de large et possède une épaisseur de 2 cm. Afin de s'assurer que le champ des vitesses d'écoulement soit bien parallèle à la pente et afin de réduire l'erreur de mesure causée par l'angle d'inclinaison, l'objectif de la caméra doit être parfaitement parallèle à la pente. L'écoulement maximal du béton est de 80 cm (distance entre l'extrémité de la trappe d'ouverture et de l'extrémité du plan).





Figure 2-15: Système expérimental du plan incliné

2.4.2. Modèle numérique

Afin de faire correspondre le modèle avec la réalité, la plaque inclinée modélisée sur le logiciel mesure 100 cm de long, 100 cm de large et son épaisseur

est infime puisque cette valeur n'est pas essentielle au calcul numérique. Fidèle au matériel expérimental, la boîte de confinement est un cube de 20 x 20 x 20 cm avec une face vide afin de modéliser la trappe ouverte. Les effets d'adhérence entre la trappe d'ouverture et le fluide, observés expérimentalement lors du soulèvement de la trappe, ne sont donc pas modélisés numériquement puisque cette dernière n'est pas présente. La Figure 2-16 montre le modèle numérique ainsi que le maillage employé.



Figure 2-16: Modélisation du plan incliné sur Flow 3D Hydro

Le maillage utilisé est élémentaire (maillage simple structuré) sur le long du plan incliné est a été affiné au fil des expérimentations afin d'obtenir le résultat le plus robuste et juste possible. Ce second cas étudié va donc permettre de comprendre concrètement le comportement du béton frais lors de son écoulement en surface libre et en condition élémentaire d'écoulement. La mesure de la distance axiale et radiale parcourue par la ligne de contact permet de comparer les écoulements entre eux et ainsi valider le modèle numérique. L'observation des profils d'écoulement et des différences de comportement souligne l'importance et la nécessité de l'implémentation d'un critère de seuil de cisaillement tridimensionnel.

2.5. Cas 3: Essai d'affaissement au cône d'Abrams

Finalement, ce dernier cas tente de valider le lien théorique entre le seuil de cisaillement et l'affaissement d'un béton. Par définition, la caractéristique essentielle pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est l'arrêt de l'écoulement du béton frais: lorsque ce dernier arrête de se mouvoir, la mesure de l'affaissement ou de l'étalement pour des bétons autoplaçants est effectuée. Cet essai peut alors être reproduit numériquement et ainsi comparer les différents résultats. À la lumière des chapitres précédents ainsi que la littérature scientifique, la modélisation du béton frais par un fluide homogène simplifie les calculs, mais est efficace et valide uniquement lorsque le matériau reste homogène (ce qui semble être le cas lors d'un essai d'affaissement sur un béton standard) et que la plus petite dimension caractéristique de l'écoulement (comme l'épaisseur et la taille de cet écoulement) est grandement supérieure à celle de la plus grande particule (Coussot & Ancey, 1999; Fall A., 2008; Roussel, 2006). La forme et la géométrie des éléments sont définies sur la Figure 2-17 et dans le Tableau 2-1.



Figure 2-17: Forme initiale du béton pendant le test d'affaissement au cône d'Abrams – Figure adaptée (Roussel, 2006)

Tableau 2-1: Longueurs normalisées de l'essai

Cône	Cône d'Abrams ASTM
$H_0(mm)$	300
$R_{min.}$ (mm)	50
R_{max} (mm)	100

Le but de ce modèle sera dans un premier temps de prouver une relation théorique entre la valeur de l'affaissement et le seuil de cisaillement (mesuré expérimentalement par les rhéomètres ICAR et IBB) pour un béton usuel. Par la suite, ce modèle permettra de comparer les résultats numériques et expérimentaux obtenus pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Finalement, ce dernier point sera essentiel afin de valider les calculs et hypothèses posées par le logiciel, basés sur un modèle de Herschel-Bulkley. La compréhension détaillée du comportement numérique de l'écoulement du béton frais apporté préliminairement par le deuxième cas d'étude est essentielle à cette étape et permet de raffiner et calibrer les différents modèles d'écoulement. Le chemin de pensée pour cette expérience peut se résumer à l'aide de la Figure 2-18.



Figure 2-18: Schéma organisationnel de l'essai d'affaissement

2.5.1. Modèle expérimental

Pour chaque échantillon, 3 mesures d'affaissement sont effectuées afin de déduire une moyenne et s'affranchir de la variabilité de l'essai au cône d'Abrams, ainsi que des mesures des paramètres rhéologiques à l'aide des rhéomètres. De plus, une captation vidéo est effectuée afin de comprendre l'évolution de l'écoulement du béton frais ainsi que sa vitesse d'étalement (Figure 2-19).



Figure 2-19: Essai d'affaissement au cône d'Abrams

2.5.2. Modèle numérique

La Figure 2-20 montre le maillage optimisé utilisé pour la modélisation de l'essai au cône d'Abrams ASTM: dans les zones où le cisaillement est le plus important, la taille des cellules est plus faible afin de rendre les calculs plus précis.



Figure 2-20: Maillage du cône d'Abrams

Puisque le problème est symétrique selon 2 axes, le modèle peut se simplifier pour uniquement calculer ¼ du cône d'affaissement et alléger le temps de calcul. La Figure 2-21 représente le modèle final.


Figure 2-21: Modélisation du 1/4 du cône d'affaissement

La forme du fluide modélisé est similaire au cône d'Abrams et les dimensions sont identiques.

2.6. Conclusions

Les différents modèles numériques, expérimentaux et théoriques évoqués dans les paragraphes précédents vont permettre de mieux comprendre les phénomènes d'écoulement et le comportement du béton frais en mouvement. En effet, la comparaison entre les forces de traînée théoriques et les forces de traînée expérimentales, la détermination des coefficients de traînée permet également, dans un premier temps de valider les calculs numériques par rapport à la théorie. De plus, ces modèles permettent une compréhension approfondie des processus d'usure et en particulier l'influence de de la pression et de la vitesse du fluide sur cette usure. La seconde étude permet de comprendre le comportement du béton frais lors de son écoulement en surface libre. La distance axiale et radiale parcourue par la ligne de contact est mesurée afin de mieux comparer les écoulements entre eux et de valider le modèle numérique. Finalement, un lien numérique entre la valeur de l'affaissement et le seuil de cisaillement est démontré. Après cette description détaillée des protocoles expérimentaux, les chapitres suivants traiteront précisément des trois modèles qui sont à l'étude dans ce projet et surtout des différentes conclusions tirées de ces expériences.

Chapitre 3 : Modélisation de l'écoulement d'un fluide autour de la sonde rhéologique - Cas 1

Ce chapitre présente les différentes expériences et les modèles numériques employés afin de mieux comprendre et analyser l'écoulement d'un fluide en mouvement autour de la sonde rhéologique. Plus précisément, les différents mécanismes que la sonde subit et profils d'usure qu'elle atteint à l'intérieur d'un camion-toupie seront étudiés. La démarche scientifique est inspirée sur l'analyse de sondes déployées industriellement ayant subi une usure particulièrement prématurée, puis sur des modèles analytiques et numériques afin de relier les parties théoriques et expérimentales.

3.1. Introduction au modèle

Comme énoncé dans les chapitres précédents, l'usure par abrasion et l'érosion sont des formes d'usure causées par le contact entre une particule fine et un matériau solide. D'un côté, l'usure par abrasion est la perte de matière associée au passage répété de particules fines et dures sur une surface d'étude. De l'autre côté, l'usure par érosion est causée par l'impact de ces mêmes particules à vitesse élevée contre la surface étudiée. Ces deux types d'usure sont des formes de dégradation rapides et sévères qui peuvent entraîner des coûts importants si elles ne sont pas contrôlées de manière adéquate. La présence de sable et de gravier fins dans le béton frais qui s'écoule autour du capteur, particulièrement le sable formé de quartzite extrêmement anguleux accélère fortement les phénomènes d'usure de la sonde. La Figure 3-1 montre bien la différence d'angularité entre deux types de sable et permet de comprendre, à la lumière des chapitres précédents, pourquoi certains sables sont plus susceptibles que d'autres de dégrader et d'user les surfaces métalliques.



Figure 3-1: Observation microscopique de sables quartziques anguleux (gauche) et de grains de sable arrondis (droite) Image de Pierre Bédard, Université Polytechnique de Montréal

Une étude expérimentale est alors réalisée à propos de l'usure de la surface extérieure de la sonde rhéologique causée par l'écoulement de béton frais ou de sable.

La genèse de ce projet a été l'observation de la dégradation prématurée de sondes installées sur des camions-toupies en production continue de béton frais. Initialement, le capteur a été dessiné et conçu pour atteindre la durée de vie d'une toupie de malaxage: entre 25 000 et 30 000 m^3 de béton produit. Dans des conditions particulièrement optimales (béton à gâchée humide sans présence de sable abrasif comme observé au Japon), la sonde a résisté sans aucune trace d'usure problématique à une utilisation quotidienne pendant plus de 5 ans. Tandis que la sonde a été redimensionnée pour résister et fonctionner en conditions normales d'utilisation pendant 4 années d'utilisation en continu, la dégradation de sa surface extérieure dans certaines régions géographiques (en Géorgie, USA) est critique au bout de 8-9 mois d'utilisation journalière (Figure 3-2).



Figure 3-2: Observation de l'usure prématurée, profil tel qu'usiné à gauche et sonde usée à droite

Il a été observé dans ces régions géographiques que les sables utilisés dans les mélanges de béton étaient particulièrement anguleux et composés de quartz. L'hypothèse soulevée par cette observation est que la présence de ces particules anguleuses et particulièrement dures accélère grandement l'usure et la dégradation des surfaces et explique donc l'abrasion particulière de ces sondes. Ce type de sable va donc être utilisé dans les nombreuses expériences présentées dans les sections suivantes.

3.2. Mesure de l'usure réelle

Des sondes prématurément usées dans les camions-toupies (4) ont été obtenues et différentes données ont été recueillies. Ces données représentent l'abrasion réelle du capteur développée à l'intérieur des toupies de malaxage. La mesure de la perte de masse est réalisée à l'aide d'une balance de précision et la mesure de la diminution du diamètre extérieur sur 4 hauteurs spécifiques de la sonde est réalisée à l'aide d'un vernier électronique. Ces différentes hauteurs d'étude sont présentées sur la Figure 3-3.



Figure 3-3: Zones d'intérêt de la sonde rhéologique

La Figure 3-4 trace l'écart relatif du diamètre, en pourcentage, des différentes zones d'étude après 8 mois d'utilisation continue sur des sondes déployées sur des camions-toupies en Géorgie, USA. Le calcul de l'écart relatif consiste à soustraire au diamètre initial le diamètre mesuré après 8 mois d'utilisation. Ce résultat est

transformé en pourcentage en divisant par le diamètre initial afin d'obtenir l'écart relatif. Cela permet de s'affranchir des différentes unités et des possibles erreurs de mesure.



Figure 3-4: Écart relatif du diamètre des zones d'intérêt de la sonde après 8 mois d'utilisation observé sur 3 spécimens

La première observation fournie par ces données prouve que l'extrémité de la sonde est la zone la plus endommagée: en moyenne 9% du diamètre maximal est perdu par usure pour la zone d'intérêt A. D'un autre côté, l'écart relatif pour des diamètres plus proche de la base du capteur semble réduit. Une moyenne de 1% pour le diamètre D est mesurée et pousse à croire que ces zones sont moins sensibles à l'usure abrasive de l'écoulement du béton frais. Ces hypothèses sont en accord avec le redimensionnement de la sonde rhéologique. En effet, avant la mise en place d'un capuchon d'usure appelé «*Wear Cap* » les dégradations rapportées se concentraient sur l'extrémité de la sonde. Cette première observation ouvre donc les portes à plusieurs autres expériences afin de mieux comprendre les phénomènes d'usure et les propriétés d'écoulement de fluides à suspension et de particules fines et dures autour du capteur.

3.3. Représentation expérimentale

La première expérience proposée consiste à réaliser une sonde en plastique PLA imprimé à l'aide de l'imprimante 3D du laboratoire de recherche (Figure 3-5). L'idée derrière ce modèle est de faire évoluer cette sonde dans un milieu abrasif et ainsi de reproduire la progression de l'usure sur les zones d'intérêt de la sonde plastique. Le plastique étant beaucoup moins résistant que l'acier, l'usure devrait donc se manifester beaucoup plus rapidement sur la sonde imprimée.



Figure 3-5: Sonde plastique

Le montage expérimental pour cet essai consiste à fixer la partie immobile (la sonde plastique et son support métallique) sur la partie fixe du malaxeur et de remplir par la suite la cuve du malaxeur de l'abrasif souhaité. Dans un premier temps, un sable de quartz employé dans les mélanges de béton où l'abrasion fortement accélérée sur la sonde est constatée sera utilisé comme abrasif. La sonde est alors immergée partiellement ($\approx 15 cm$) dans cet abrasif (la zone d'intérêt avec le «*Wear Cap»* l'est complètement) et la cuve est mise en rotation afin de simuler l'écoulement des grains de sable autour de la sonde (Figure 3-6).



Figure 3-6: Prototype de montage (gauche) et montage expérimental final (droite)

L'écoulement tout au long de l'expérience est supposé laminaire en amont de l'obstacle car la vitesse de déplacement du sable est faible, homogène et symétrique tout autour de la sonde. La Figure 3-7 recense les zones d'intérêts étudiées tout au long de cette expérience. Il est à noter que le diamètre au point D est uniquement à titre de comparaison puisque ce dernier n'est en aucun temps plongé dans l'abrasif.



Figure 3-7: Zones d'intérêts de la sonde en plastique

Le temps total d'écoulement est de 25 heures et des mesures de diamètres et de masses totales sont réalisées toutes les 3 heures. Les écarts relatifs de diamètres, présentés à la Figure 3-8, montrent bien que la zone préférentielle d'usure est bien à l'extrémité de la sonde: là où se situe le «*Wear Cap*». Le diamètre E, situé à l'extrémité du «*Wear Cap*» se retrouve avec un écart relatif maximal de diamètre de

1.8%. De plus, seulement 0.6% d'écart relatif est observé aux diamètres A et B situés eux aussi sur cette zone. Les écarts relatifs pour les autres zones d'intérêts ne sont pas relevés ici puisque la pression exercée par le sable n'est pas suffisante pour observer des signes d'usure et de dégradation. En effet, la zone C ne présente aucun signe d'usure significative et le diamètre D n'est pas plongé pas dans l'abrasif. D'après la figure ci-dessous, la zone préférentielle d'usure est bien l'extrémité et cette hypothèse est en accord avec les résultats précédents.



Figure 3-8: Évolution des écarts relatifs de diamètres à différentes hauteurs de la sonde plastique

Du point de vue de la perte de masse totale, les résultats semblent cohérents avec les premières conclusions. Plus l'expérience avance, plus la perte de matière est conséquente (Figure 3-9).



Figure 3-9: Évolution de l'écart relatif de masse de la sonde plastique

Cependant, cette expérience dévoile les limitations du protocole expérimental. En particulier, l'utilisation d'une sonde imprimée en plastique est remise en question puisque la présence visuelle de paliers brusques de progression de l'usure est rapidement observée. Un palier est particulièrement remarguable après 6 heures d'expérimentation et identifie une des faiblesses du montage. En effet, puisque cette sonde est réalisée à l'imprimante 3D (qui utilise une technique de superposition de couches de plastique), lorsqu'une fine couche se détache de l'objet, une perte importante de masse et de diamètre est observée. Puisqu'il n'y a pas de continuité dans la matière, la présence de paliers brusques d'arrachement dans le processus d'usure est problématique. En effet, lorsqu'une partie d'une couche se détache partiellement, l'abrasif va très rapidement l'arracher entièrement. Cette expérience préliminaire ne permet donc pas d'identifier clairement un schéma ou un profil d'usure prépondérant comme constatés en chantier puisqu'une progression brusque de l'usure se manifeste sur la sonde plastique. Les phénomènes d'usure ne sont donc pas identiques à la pratique, cependant, l'observation de cette progression de l'usure sur le «Wear Cap» est très intéressante. En effet, des zones d'écoulement sont clairement visibles (Figure 3-10).



Figure 3-10: Image de la sonde rhéologique après l'expérience: Face à l'écoulement (image de gauche), de côté (image du milieu) et en arrière de l'écoulement (image de droite)

La zone qui s'oppose au sens du mouvement (première image) subit une pression de l'ensemble des grains de sable importante et une vitesse d'écoulement faible tandis que la zone représentée par la photographie du milieu (zone tangente à l'écoulement) subit une pression faible et une vitesse d'écoulement élevée. Ce schéma d'écoulement est en accord avec la théorie puisqu'à la lumière du chapitre 2.1.1, les forces de pression s'appliquent et sont prépondérantes sur une surface perpendiculaire au flux d'écoulement. La Figure 3-11 identifie bien cette répartition de pression de l'écoulement du fluide autour de la sonde.



Figure 3-11: Répartition des forces de pression autour de la sonde rhéologique

En amont de l'écoulement, la surface extérieure de la sonde est la zone où les pressions sont maximales puisque la surface projetée est perpendiculaire au sens d'écoulement. De l'autre côté, la pression est nulle au niveau des surfaces qui sont tangentes à l'écoulement. Finalement, une zone de pression faible est observable en aval de l'écoulement, car la surface extérieure n'est plus en opposition directe du mouvement du fluide.

De plus, la Figure 3-12 représente la répartition des vecteurs de vitesse d'écoulement du fluide autour de la sonde rhéologique. À l'inverse des forces de pression, les zones en amont et en aval de l'écoulement présentent des vitesses nulles puisqu'il s'agit là d'un point d'arrêt de l'écoulement (Bruschi et al., 2003). De plus, la vitesse d'écoulement est maximale sur les zones tangentes au mouvement. Finalement, une complémentarité entre les vecteurs de vitesse et de pression du fluide sur l'obstacle rencontré est démontrée expérimentalement et théoriquement. Cette relation permet donc de mieux comprendre le comportement réel de l'écoulement d'un fluide autour de l'obstacle qui est la sonde rhéologique.



Figure 3-12: Répartition des vecteurs de vitesse autour de la sonde rhéologique

De plus, une observation plus poussée de la surface extérieure de la sonde plastique permet de tirer différentes conclusions. À la Figure 3-13, l'évolution de l'usure au

niveau du «*Wear Cap*» de la sonde plastique est montrée. Cette observation traduit, dans un sens, les phénomènes d'usure abrasive. La première photographie montre bien la façon dont la sonde a été conçue: une addition de couches successives est observable, tandis que les deux images suivantes montrent la progression de l'usure et la perte de matière au niveau de la zone préférentielle de dégradation. Le «*Wear Cap*» est donc encore une fois la zone préférentielle de dégradation prématurée et correspond aux observations précédentes.



Figure 3-13: Évolution de l'usure de la sonde plastique

La prochaine étape du protocole expérimental consiste à dessiner un quadrillage sur la surface extérieure de la sonde réelle (Figure 3-14). Cette sonde quadrillée est plongée dans du béton frais en mouvement (montage similaire à la Figure 3-6) afin de confirmer les précédentes observations au sujet des profils d'écoulement.



Figure 3-14: Mise en place d'un quadrillage visuel

La Figure 3-15 montre le contour du béton frais une fois que la sonde est extraite du montage expérimental. Les observations illustrées précédemment corrèlent bien avec le profil d'écoulement des images présentées à la Figure 3-16. En effet, cette expérience permet d'obtenir les profils d'écoulement du béton frais au contact de la sonde et ces derniers semblent similaires à l'écoulement du sable. L'endroit le plus

touché par cet écoulement est la zone où la surface est tangente à l'écoulement et où la combinaison entre la vitesse et la pression semble la plus forte. Visuellement, le quadrillage de cette zone est le plus dégradé. Cette zone présente en effet des vitesses élevées et une pression quasi nulle, car elle s'éloigne du point d'arrêt, signifiant que les phénomènes d'usure sont prépondérants à cet endroit.



Figure 3-15: Contour du béton frais autour de la sonde rhéologique: Face à l'écoulement (image de gauche), de côté (image du milieu) et en arrière de l'écoulement (image de droite)





Figure 3-16: Zones de préférence d'écoulement sur la sonde rhéologique: Face à l'écoulement (image de gauche), de côté (image du milieu) et en arrière de l'écoulement (image de droite)

La zone face à l'écoulement semble être moins touchée par l'usure puisque dans cette région, la dégradation du quadrillage apparaît plus faiblement. Puisque la pression est maximale et la vitesse est nulle, les mécanismes d'abrasion ne se manifestent pas. Finalement la dernière zone qui ne montre aucun signe d'effacement et de dégradation est la zone arrière. Cela peut s'expliquer notamment par une pression très faible (voire nulle) et des vitesses d'écoulement pratiquement

nulles. Ces résultats sont en accord avec ce qui a été démontré précédemment, car les zones montrant des signes d'usure prématurée semblent identiques pour les différentes expériences.

Finalement, la dernière campagne expérimentale consiste à peindre la sonde de couches de peinture de couleurs différentes. Les épaisseurs de ces couches sont constantes et permettent de visualiser et identifier précisément le profil et les zones préférentielles d'usure sur la surface de la sonde. La Figure 3-17 représente la superposition des différentes couches appliquées. Afin de réaliser ces couches, la sonde est fixée sur un appareil mis en rotation afin de permettre un peinturage homogène et identique en tout temps. La séquence de peinture appliquée est en premier lieu une sous-couche de fixation grise, de la peinture en vaporisateur rouge, bleue, verte puis grise.



Figure 3-17: Superposition des couches de peinture colorée

Après plusieurs cycles d'écoulement à l'intérieur du malaxeur et dans le sable abrasif, des premières traces d'usure apparaissent sur la périphérie du «*Wear Cap*» au bout de 5 minutes seulement (Figure 3-18).



Figure 3-18: Image d'arrachement de la peinture après 5 minutes d'écoulement

Cette usure est présente uniquement sur la zone qui se situe près de la paroi de la cuve du malaxeur (distance de 2 centimètres avec la sonde). Il est donc possible de poser l'hypothèse qu'une zone de surpression et de vitesses accrues, accélérant l'usure, est créée par la proximité avec la surface extérieure de la cuve. Cette zone de dégradation n'est donc pas étudiée puisque les conditions d'écoulement semblent modifiées à cause du montage expérimental. Des limitations similaires concernant ce problème peuvent être alors émises à propos des expériences précédentes. En augmentant le temps d'écoulement (pour un total de 5 heures), d'autres zones de dégradation apparaissent de l'autre côté de la sonde et des dégradés de couleur sont plus facilement observables. Cette zone particulière sera alors une zone d'étude puisqu'elle n'est pas influencée par les conditions aux limites du malaxeur. De plus, l'hypothèse d'un écoulement uniforme et symétrique autour de la sonde permet d'extrapoler le profil d'usure de la sonde avec uniquement l'étude de la moitié du diamètre faisant face à l'intérieur du malaxeur. La Figure 3-19 et la Figure 3-20 illustrent l'usure, sous différentes vues, des couches de peinture après 5h d'écoulement de la sonde dans le sable de quartz ainsi que le dégradé de couleurs associé.



Figure 3-19: Zones d'usure de la sonde après 5h – Vue de face – avant et après traitement de l'image



Figure 3-20: Zones d'usure de la sonde après 5h – Vue de côté – avant et après traitement de l'image

Après l'analyse des nombreuses sondes soumises au même protocole expérimental puis la comparaison des profils d'usure qui semblent tous similaires, il est possible de créer une 'carte', en trois dimensions, de l'usure de la sonde et des zones dégradées par abrasion. Cette carte permet alors de comprendre comment l'usure se manifeste sur la sonde lors de l'écoulement d'un abrasif (du sable de quartz dans cette expérience). La Figure 3-21 présente donc le dégradé de couleur similaire représentant l'état de dégradation: la couleur grise correspond à une non-usure de la surface tandis que les plages de couleur blanc et rouge correspondent à un degré de dégradation avancé.





Il est important de noter que la séquence de peinture identifiée précédemment était identique pour chaque sonde étudiée et que ces dernières ont subi un traitement de surface afin de rendre l'enveloppe extérieure de la sonde lisse et optimale pour que la peinture adhère bien. De plus, l'hypothèse d'un écoulement symétrique autour de l'obstacle permet de focaliser l'étude sur la moitié du diamètre réel et de supposer que la carte d'usure est simplement symétrique de part et d'autre de la sonde. La zone située près de la cuve du malaxeur n'est donc pas prise en compte, car l'étude se porte uniquement sur la partie 'intérieure' qui n'est pas influencée par les conditions aux limites. Des conclusions similaires aux expériences précédentes ont été observées: il y a bien évidemment des zones privilégiées par les mécanismes de dégradation et où l'usure prématurée est particulièrement observable. La zone tangente à l'écoulement (notée zone B et B' sur la Figure 3-21) est l'endroit où la surface subit la plus grosse dégradation. Le «Wear Cap» est évidemment l'endroit le plus touché puisque les couches colorées se retrouvent complètement effacées en premier lieu. Par la suite, la partie basse du «Wear Cap» ainsi que la partie cylindrique de la sonde subissent à leur tour des dégradations plus modérées: l'apparition d'un dégradé de couleur est observable. La zone face à l'écoulement (zone *A*), subit de faibles dégradations au niveau du cylindre, mais une plus forte usure aux extrémités du «Wear Cap». L'axe central de cette zone semble ne pas être affecté par l'écoulement du sable puisque la première couche de peinture grise est encore facilement observable. Cette zone correspond au point d'arrêt de l'écoulement du fluide, l'endroit où la vitesse est nulle. Finalement, la dernière zone (zone C) correspond au sillon de l'écoulement qui est très peu voire pas du tout touché puisque la couche grise est uniforme et encore intacte sur cette surface d'étude. Les pressions faibles et la vitesse nulle d'écoulement engendré par le sillon ont sans aucun doute un impact direct sur l'usure.

Les données obtenues au laboratoire se rapprochent des résultats observés sur les sondes déployées industriellement; les zones privilégiées de dégradation ont été clairement identifiées. Cependant, l'influence véritable des forces de pression et de la vitesse d'écoulement du fluide autour de l'obstacle sont encore inconnues puisque ces expérimentations ne quantifient pas réellement la quantité de mouvement ainsi que la pression qu'applique le fluide sur la sonde. L'analyse numérique et théorique semble être alors le moyen le plus intéressant pour obtenir la répartition de la pression et de la vitesse tout autour de la sonde et ainsi comprendre l'influence de ces paramètres sur l'usure abrasive.

3.4. Analyse théorique

Afin de comprendre entièrement le phénomène d'usure et l'écoulement d'un fluide autour de la sonde rhéologique, une étude théorique des forces en jeu autour de l'obstacle est nécessaire. En dynamique des fluides, la première valeur à définir pour un obstacle qui est placé dans l'écoulement d'un fluide est le coefficient de traînée de cet objet. Ce coefficient permet de comprendre les différentes forces de traînée et de pression que le fluide exerce. À la lumière des chapitres précédents, la méthode théorique utilisée pour le calcul du coefficient de traînée d'un objet cylindrique consiste à approximer la traînée totale par la traînée de pression (ref. section 2.1.2). La traînée de pression est ensuite calculée à partir de la distribution de la pression sur la surface de contrôle. En reprenant les hypothèses énoncées aux sections 2.1.2 et 2.1.3, le graphique suivant peut être tracé et permet ainsi d'obtenir l'évolution théorique du coefficient de pression d'un cylindre placé dans le flux d'écoulement d'un fluide (Figure 3-22).



Figure 3-22: Coefficient de pression théorique exercé par l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre

Dans un premier temps, ce coefficient va permettre de comparer la répartition des pressions obtenue expérimentalement (section 3.3), analytiquement (graphique cidessus), et numériquement (section 3.5). De plus, si l'analyse théorique et numérique sont en accord, il est possible d'imaginer obtenir la combinaison optimale des facteurs physiques (la répartition de la vitesse et des pressions) qui favorise les mécanismes d'usure sur la sonde. Cette analyse peut alors permettre d'optimiser la forme de la sonde si une étude plus poussée est menée. La section suivante traitera donc logiquement de l'analyse numérique du problème.

3.5. Résultats numériques

Le modèle numérique employé est illustré à la Figure 3-23. La sonde est placée à l'intérieur d'un maillage double, imbriqué l'un dans l'autre. Il est rempli entièrement de fluide en mouvement dont la vitesse peut être modifiée. Le maillage a été optimisé afin de répondre entièrement aux hypothèses imposées par les deux modèles de calcul du coefficient de traînée. Le maillage fin est calibré en fonction du premier maillage afin de réduire les pertes de données ainsi que les erreurs de calcul du logiciel.



Figure 3-23: Modèle numérique sous Flow 3D Hydro - Écoulement fluide simple autour de la sonde rhéologique

L'objectif premier de ce modèle est d'extraire les différentes données physiques intéressantes. Le logiciel transmet à l'utilisateur les résultats des calculs effectués sur chaque nœud du maillage (intersection entre 4 mailles). La pression exercée par le liquide sur la sonde et la répartition de la vitesse d'écoulement du fluide sur la surface extérieure du capteur sont les données extraites par ce modèle. La Figure 3-24 illustre le nuage de point retourné par le logiciel.



Figure 3-24: Extraction des points d'intérêts sur le nuage de points

Une valeur numérique est attribuée à chaque nœud pour toute valeur physique (pression, vitesse, fraction du fluide, etc.) que le logiciel calcule. Le traitement de données consiste alors à extraire les points d'intérêts (points vert et rouge) situés en périphérie de la surface de la sonde (points orange) afin de connaître les forces de pression et la quantité de mouvement que le fluide exerce sur la sonde. Puisque la surface extérieure étudiée est cylindrique tandis que le maillage est rectangulaire, il est donc impossible d'obtenir des valeurs correspondant au contour exact. Une moyenne est donc faite entre les points proches de la surface afin d'obtenir le résultat le plus précis. Un programme Python est alors employé afin d'extraire uniquement ces points d'intérêts et ainsi réduire le nombre de données à traiter.

3.5.1. Méthode de distribution des pressions

Afin de calculer le coefficient de traînée, la première méthode utilisée est la méthode de distribution de pression (ref. section 2.1.2). La force de traînée totale de la sonde est calculée en intégrant les composantes de pression différentielle sur sa surface. Le fluide modélisé est de l'eau et il est mis en mouvement dans l'espace selon l'axe horizontal.

La Figure 3-11 et la Figure 3-12, utilisées précédemment, permettent de comprendre visuellement la répartition de la pression et des vitesses d'écoulement du fluide sur et autour de la sonde. La Figure 3-25 montre la répartition en trois dimensions de la pression autour de la sonde pour une vitesse d'écoulement de 0.4 m/s et la Figure 3-26, la répartition des vecteurs de vitesse. Sur ces différents graphiques, la surface extérieure de la sonde est projetée selon le plan (x,y) et la 3^{ème} dimension représente la valeur de la pression ou de la vitesse du fluide. Ces courbes permettent donc de comprendre concrètement la répartition autour de la surface extérieure de la sonde concrètement la répartition autour de la surface extérieure de la sonde concrètement la répartition autour de la surface extérieure de la sonde concrètement la répartition autour de la surface extérieure de la sonde concrètement la répartition autour de la surface extérieure de la sonde concrètement la répartition autour de la surface extérieure de ces deux paramètres physiques.



Figure 3-25: Répartition de pression autour de la sonde – Vitesse du fluide de 0.4 m/s – Deux points de vue différents



Figure 3-26: Répartition de la vitesse autour de la sonde – Deux points de vue différents

Comme évoqué précédemment, la première observation est que la surface face à l'écoulement du fluide subit une forte pression et des vitesses d'écoulement quasiment nulles. Les zones sur le côté présentent une vitesse d'écoulement élevée (0.6 m/s par endroit) et une pression faible. Finalement, la partie en aval de l'écoulement présente une vitesse nulle et une pression relativement élevée. Les résultats obtenus ci-dessus sont très similaires aux hypothèses énoncées précédemment. La répartition de pression autour de la surface extérieure permet à l'aide le calcul du coefficient de pression selon la méthode de la distribution de pression. Cet essai a été répété plusieurs fois à des vitesses et des hauteurs différentes et les conclusions sont à chaque fois identiques. D'un point de vue de la variation du coefficient de pression C_P , les données extraites permettent de tracer le graphique suivant (Figure 3-27). Le coefficient de pression en fonction de l'angle d'inclinaison de la surface normale est alors tracé sur la moitié du cylindre représentant la surface extérieure de la sonde.



Figure 3-27: Variation du coefficient de pression Cp

Les coefficients de pression, obtenus tout autour du cylindre, ont été comparés aux valeurs correspondant à l'écoulement idéal sur la Figure 3-27 et semblent être en accord avec la littérature scientifique (Baracu T., 2012; Bruschi et al., 2003; Fox R.

& McDonald A., 2004; Massey & Smith, 2012; Nakayama & Boucher, 2000; Raper, 1966; Sooraj et al., 2018; University College London, 2010). Pour un écoulement considéré comme laminaire (faible nombre de Reynolds, car inférieur à (30×10^4) , les forces visqueuses sont prédominantes. Puisque les vitesses étudiées sont relativement faibles dans cette expérience (la valeur extrême étant de 1 m/s) et que le nombre de Reynolds en question est significativement en dessous du seuil de transition vers un système turbulent, l'écoulement en amont de l'obstacle est caractérisé comme laminaire. De l'autre côté, le sillage (la partie aval de la sonde) produit par l'obstacle forme une zone de turbulence. Cette zone turbulente s'explique par la séparation de la couche limite d'écoulement qui forme alors dans le flux du fluide, deux tourbillons tournant dans des directions opposées. Derrière ces tourbillons, les lignes de courant principales se rejoignent, car le nombre de Reynolds est relativement faible, reformant alors un écoulement laminaire. Dans ces conditions précises d'écoulement, cette séparation se produit à environ 82 degrés et le coefficient de pression reste négatif et s'approche de la valeur de -1,00. La Figure 3-28 illustre la courbe théorique obtenue après toutes ces hypothèses.



Figure 3-28: Répartition de pression autour du cylindre Figure extraite(Nakayama & Boucher, 2000)

C'est donc à cause de ce phénomène turbulent que le coefficient de traînée numérique s'éloigne de la courbe théorique passé un angle de 80 degrés. Cependant, les courbes numériques semblent prometteuses, notamment pour

l'optimisation de la forme de la sonde. Une forme plus aérodynamique de le surface extérieure de la sonde pourrait être imaginé afin de réduire les phénomènes d'usure. Les coefficients de traînée sont ensuite calculés à différentes vitesses d'écoulement et sont présentés dans le tableau suivant. Les résultats obtenus permettent d'affirmer que dans cette plage de vitesse, le coefficient de traînée est sensiblement identique et le modèle numérique est valide. La moyenne du coefficient de traînée est de 1.33 et correspond à la théorie (Baracu T., 2012; Bruschi et al., 2003; Raper, 1966; Sooraj et al., 2018).

Vitesse d'écoulement (m/s)	Coefficient de traînée C _D
0.1 <i>m/s</i>	1,12
0.2 <i>m/s</i>	1,15
0.3 <i>m/s</i>	1,17
0.4 <i>m/s</i>	1,22
0.5 <i>m/s</i>	1,23
0.7 <i>m/s</i>	1,58
1 <i>m/s</i>	1,48

Tableau 3-1: Coefficients de traînée à différentes vitesses d'écoulement à diamètre identique

À vitesse constante et en faisant varier la hauteur de mesure (comme montré à la Figure 3-29), le résultat du calcul de coefficient de traînée permet d'en tirer une analyse différente.



Hauteur de mesure	Coefficient de traînée C _D
Z ₁	1,63
Z ₂	1,34
Z ₃	1,30
Z_4	1,267
Z_5	1,97
Z_6	2,47

Figure 3-29: Mesure du coefficient à différentes hauteurs

Le tableau de la Figure 3-29 montre que pour des diamètres sensiblement identiques $(Z_2, Z_3 \text{ et } Z_4)$ les coefficients de traînée se ressemblent. Cependant, lorsque la hauteur d'analyse se rapproche des extrémités, la valeur du coefficient augmente fortement. Ce phénomène s'observe particulièrement autour de la hauteur Z₆, l'endroit où le «Wear Cap» est situé. Cette analyse et ce résultat particulier sont explicables puisque le diamètre de l'obstacle augmente et l'écoulement du fluide est particulièrement perturbé à ses extrémités. La moyenne du coefficient de traînée pour cette expérience est de 1.66. Le Tableau 3-1 montre bien que la variation du coefficient de traînée ne varie pas drastiquement selon la vitesse d'écoulement (l'écart entre la valeur maximale et minimale est de 20%). La variation peut s'expliquer par les hypothèses simplifiées du modèle numérique, la présence d'un obstacle non cylindrique et non infini sur toute sa longueur et enfin finalement les approximations liées au traitement de données. La complexité entre les hypothèses théoriques et la réalité numérique est fortement montrée ici: la différence de courbe entre la théorie et l'expérimentation est représentée à la Figure 3-27. Les courbes C_P calculées s'écartent de la courbe théorique de l'écoulement laminaire. Ce phénomène s'explique, à la lumière des paragraphes précédents, par l'apparition d'une zone turbulente dans le sillage de la sonde en raison de la séparation de la couche limite. Le sillon ainsi formé perturbe l'écoulement laminaire et donc les valeurs du coefficient de traînée. Finalement les valeurs de C_D obtenues avec le logiciel (une moyenne de 1.33) semblent assez cohérentes avec les résultats attendus par l'évaluation théorique du coefficient d'un cylindre fini. La sonde n'étant pas un cylindre parfait infini (la Wear Cap crée une zone de non-linéarité et augmente le diamètre global), une valeur plus élevée de ce coefficient de traînée est donc observée. La valeur numérique moyenne de 1.33 est donc logiquement plus élevée que la valeur théorique d'un cylindre infini qui est de 1.20 (Figure 3-30).

	l/d = 1		0.63
	2		0.68
	5		0.74
	10	dl	0.82
	40		0.98
d	∞		1.20

Figure 3-30: Valeurs théoriques du coefficient de traînée d'un cylindre en fonction de l'allongement de ce dernier - Figure extraite (Nakayama & Boucher, 2000)

Finalement, cette méthode permet d'extraire les valeurs de pression et ainsi calculer le coefficient de traînée en périphérie de la sonde.

3.5.2. Influence des paramètres physiques sur l'usure abrasive

D'un autre côté, le modèle numérique permet d'obtenir la répartition de la vitesse du fluide autour de l'obstacle. Les figures suivantes représentent la répartition (en pourcentage) de la pression ainsi que des vecteurs de vitesse sur une vue de coupe de la sonde. La surface étudiée sur la Figure 3-31 est la surface extérieure au niveau du «*Wear Cap*». Des graphiques similaires ont été tracés à différentes hauteurs d'étude et les courbes sont sensiblement identiques.



La taille des cercles est proportionnelle à la pression

Figure 3-31: Répartition du pourcentage de pression et de vitesse autour de la sonde

Afin de comprendre l'influence de ces deux paramètres sur les mécanismes d'usure, une relation linéaire du pourcentage d'usure est proposée en fonction de ces deux valeurs. L'équation 3.1 représente l'influence sur les phénomènes d'usure de la répartition de pression et le de la répartition des vecteurs de vitesse autour de la sonde.

$$Usure_{sonde}[\%] = k_{Pression} * P_{\%} + k_{pression} * v_{\%}$$
(3.1)

Afin de rendre plus réaliste le modèle, plusieurs adaptations des données numériques par rapport à la théorie ont été proposées. Premièrement, une réduction numérique de la pression en aval est mise en place, car en réalité l'abrasif ne remplit pas entièrement la cuve dans le modèle expérimental et rend donc l'écoulement non homogène dans le sillon de la sonde. Dans un second temps, la mise en place de zones d'arrêts où les vecteurs de vitesse sont nuls en avant et arrière de la sonde a été réalisée afin de mieux correspondre à la réalité. Après plusieurs adaptations et calibrations des données numériques, la Figure 3-32 présente la courbe représentant le pourcentage d'usure théorique du contour de la sonde en fonction de ces deux paramètres physiques.





La taille des **cercles** est proportionnelle à la pression Répartition du pourcentage d'usure autour de la sonde

La conclusion présence de 3 contour faisant faible. La pourcentage en premier.

qui peut être tirée de ce graphique est encore une fois la zones d'usure différente. La première zone correspondant au face à l'écoulement et la zone qui subit une usure relativement deuxième zone, tangente à l'écoulement, est soumise au d'usure le plus fort et sera donc la surface qui va se dégrader Finalement, la dernière zone, en aval de l'écoulement, ne subit

très peu voire pas d'usure comme observé expérimentalement. Les résultats observés théoriquement, numériquement et expérimentalement semblent alors être en accord. Cette méthode de répartition du pourcentage d'usure a été testée à différentes hauteurs de la sonde et a permis d'obtenir des conclusions similaires. Le modèle numérique est donc valide et permet de comprendre l'influence de la pression et de la vitesse sur les phénomènes d'usure abrasive.

3.5.3. Méthode du volume de contrôle

La deuxième méthode de calcul du coefficient de traînée numérique utilisée est la méthode du contrôle de volume. Elle consiste à une résolution indirecte de la force de traînée en évaluant l'écoulement et les vecteurs de vitesse traversant les volumes de contrôle. Ce modèle va permettre de comparer les résultats obtenus avec la méthode précédente. La conservation de la quantité de mouvement est alors utilisée pour résoudre les équations physiques, déterminer la force de traînée et ainsi obtenir le coefficient de traînée. En connaissant la variation de vitesse entre les deux volumes de contrôle, le calcul du coefficient de traînée est possible en mesurant la perte de quantité de mouvement. Les deux courbes particulièrement intéressantes dans ce modèle représentent l'évolution de la vitesse d'écoulement selon l'axe x et l'évolution de la vitesse d'écoulement en aval de la sonde selon l'axe y (Figure 3-33).



Figure 3-33: Profils d'évolution de la vitesse d'écoulement

D'après la Figure 3-34, la vitesse d'écoulement du fluide chute drastiquement à l'approche de la surface de l'obstacle. Cette dernière se rapproche fortement d'une valeur nulle et devient même négative derrière le cylindre en question. La littérature (Bruschi et al., 2003) explique cela par l'apparition du sillage turbulent causé par l'insuffisance de quantité de mouvement dans l'écoulement du fluide. Ce déséquilibre de forces de pression en amont et en aval de l'obstacle est donc à l'origine de la force de traînée du fluide sur l'obstacle.



Figure 3-34: Évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance en x

Les résultats montrés à la figure précédente permettent de valider encore une fois le modèle numérique en comparaison avec le modèle théorique et les modèles développés par la littérature scientifique. La vitesse d'écoulement du fluide supposée uniforme en amont de la sonde se retrouve perturbée à son contact. La méthode de calcul exige de se placer à une position suffisamment éloignée de la zone turbulente (estimé à 5 fois le rayon de la sonde) et de tracer la différence de vitesse selon l'axe y (Figure 3-35). Cette différence de vitesse est alors directement reliée à la perte de quantité de mouvement générée par l'obstacle et permet, grâce aux différentes équations théoriques, d'en déduire le coefficient de traînée de la sonde (ref. section 2.1.3).



Figure 3-35: Évolution de la vitesse d'écoulement en aval de la sonde

De manière similaire à la première méthode, le coefficient de traînée C_D est calculé à différentes vitesses d'écoulement afin d'en obtenir une moyenne. Les résultats sont totalement en accord avec la méthode précédente puisque le coefficient de traînée de l'objet varie légèrement lorsque la vitesse change.

Vitesse d'écoulement (m/s)	Coefficient de traînée C _D	Écart avec la méthode 1 [%]
0.2 <i>m/s</i>	1,14	0.94
0.4 <i>m/s</i>	1,20	1.82
0.5 m/s	1,23	0.17
0.7 <i>m/s</i>	1,61	2.13

Tableau 3-2: Coefficients de traînée à différentes vitesses d'écoulement – Méthode du volume de contrôle

D'un point de vue comparatif, l'écart entre les résultats à vitesse identique entre les deux méthodes varie entre 0.2 et 2%. Un lien et une corrélation entre les données fournies par ces deux méthodes numériques sont donc démontrés puisque les valeurs semblent être en accord sur la plage de vitesse étudiée. Ce coefficient semble légèrement augmenter lorsque la vitesse d'écoulement s'élève. Les deux modèles sont donc valides pour le calcul de coefficient de traînée pour un diamètre constant. D'une autre part, les hypothèses sur lesquelles se reposent les calculs de cette deuxième méthode ne permettent pas de comprendre l'influence de la hauteur de la mesure sur le coefficient de traînée. En effet, la Figure 3-36 trace l'évolution de la vitesse d'écoulement en aval de l'obstacle pour différentes hauteurs de mesure et prouve que cette méthode est invalide lorsque la hauteur d'étude varie.



Figure 3-36: Évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance en y

Dans les calculs précédents, le diamètre étudié est constant, cependant une quelconque variation de diamètre entraîne une perturbation des vitesses en aval à toutes les hauteurs. Si le diamètre de la sonde varie, les vecteurs de vitesses d'écoulement après l'obstacle seront donc pollués par les vecteurs de vitesse des autres diamètres des autres hauteurs. Comme montré à la Figure 3-36, pour des hauteurs proches des extrémités (Z_1 et Z_6) la vitesse d'écoulement se retrouve faiblement perturbée par l'obstacle, car sa valeur varie peu (elle reste proche de

0.5 m/s). Ce résultat suppose alors que la sonde dévie très peu le flux d'écoulement et donc n'a que très peu d'impact sur la vitesse à ces hauteurs. D'un autre côté, pour des hauteurs proches du centre de la sonde, la variation est beaucoup plus importante et la sonde se retrouve plus sollicitée. Les hypothèses de ce modèle supposent un cylindre de longueur infini par rapport à son diamètre et donc que les conditions aux limites de l'obstacle sont repoussées à l'infini. Dans le cadre de hauteurs de mesure proches des extrémités de la sonde, les résultats fournis par cette méthode sont alors erronés. Finalement, cette méthode ne permet pas de comprendre l'influence de la hauteur d'analyse sur le coefficient de traînée. Cependant en se plaçant au centre de la sonde, le coefficient de traînée obtient une moyenne de 1.29 pour cette méthode d'analyse et se rapproche très fortement du coefficient de traînée de la première méthode. La seconde méthode de calcul permet donc de déterminer le coefficient de traînée de la sonde et ainsi valide le modèle et les hypothèses posées par la première méthode.

3.6. Comparaisons et conclusions

La première conclusion apportée par ce chapitre est que le profil d'usure abrasive de la sonde rhéologique comporte de nombreuses similitudes entre la partie expérimentale, la partie théorique et la pratique industrielle. Ces zones de dégradation prématurées se retrouvent particulièrement au niveau du «*Wear Cap»* car cette pièce crée une turbulence dans l'écoulement. Cette turbulence a pour effet direct la modification des forces de pression et de la vitesse de fluide autour de cette surface. L'identification des différentes zones et régions d'usure prématurée par les différentes expériences permet donc de quantifier l'influence de la pression et de la vitesse d'écoulement du fluide sur ce phénomène. Afin de rendre la sonde la plus durable possible, il faudrait alors appliquer cette étude sur différentes formes de sonde et différents profils d'écoulement (dans un camion-toupie par exemple) afin d'optimiser sa forme. L'étude préliminaire qui vient d'être démontrée est donc essentielle avant de pouvoir espérer une quelconque optimisation. De plus, cette expérience et ces premiers modèles ont permis de mieux comprendre le comportement d'écoulement d'un fluide tout autour du capteur. La détermination théorique et numérique du coefficient de traînée permet d'un côté la validation du modèle et de l'autre le calcul direct des forces de traînées que le fluide applique sur l'obstacle. La suite logique de ces expériences est alors la modélisation de l'écoulement du béton frais autour du capteur. Puisque la sonde rhéologique permet d'obtenir la pression que le béton frais applique sur sa surface dans un camiontoupie, la comparaison des valeurs obtenues numériquement et expérimentalement permet de valider le modèle et s'assurer que le fluide modélisé soit bien le béton frais étudié. Les forces de pression mesurées par le capteur seraient alors reliées directement avec le coefficient de traînée calculé par le logiciel et un lien concret entre ces deux valeurs pourrait être exploité.

Chapitre 4 : Modélisation de l'écoulement du béton frais sur plan incliné - Cas 2

L'évaluation des propriétés rhéologiques du béton frais est un sujet présent dans la communauté scientifique depuis les dernières décennies. Il est donc extrêmement pertinent de développer un modèle qui simule l'évolution de l'écoulement du béton frais en fonction de ces propriétés rhéologiques. De plus, il semble intéressant de tester cet écoulement dans un cas de figure simple et élémentaire, comme sur un plan incliné. Puisque dans le cadre industriel et dans l'environnement où la sonde est installée, le volume de fluide étudié est situé à l'intérieur de la toupie de malaxage, où la surface est large et complexe (présence d'une vis d'Archimède), l'étude numérique ou expérimentale à son contact semble délicate. Comme énoncé dans les chapitres précédents, le défi de ce projet est donc de proposer une surface élémentaire permettant une circulation libre du fluide afin de rendre le modèle plus simple possible. De nombreuses applications industrielles impliquent et mettent en œuvre la libération et l'écoulement d'un volume fini de matériaux viscoplastique sur un plan incliné. En particulier, l'étude de l'écoulement des fluides Binghamiens comme de la boue, de la lave torrentielle et du gel de Carbopol (Cochard & Ancey, 2009; Nikitin et al., 2011; Schaer, 2019) sur un plan incliné a été une grande source d'inspiration pour cette expérience. L'évaluation de l'étalement et du profil d'écoulement en surface libre du béton frais est alors faite sur ce plan incliné simple à angle variable. La validation du modèle numérique se fait par observation et comparaison avec la partie expérimentale.

4.1. Résultats expérimentaux

Comme expliqué à la section 2.4.1, l'expérience consiste à remplir la boîte de confinement de béton frais en trois couches successives puis d'ouvrir la trappe de confinement afin de laisser le béton s'écouler sur une surface libre et inclinée. Une captation vidéo est réalisée pendant l'expérience afin d'identifier en temps réel les comportements et les zones d'écoulement du béton. Une photographie est prise à la fin de l'écoulement afin d'évaluer les contours laissés par la trace de béton frais.
4.1.1. Observations préliminaires

La Figure 4-1 ci-dessous présente les étapes d'écoulement et d'étalement du béton frais sur le plan incliné. Dans un premier temps, le fluide s'écoule symétriquement et approche rapidement sa largeur maximale d'étalement. Une fois cette dernière atteinte, le béton continue de s'écouler par gravité tout en conservant une largeur constante ou inférieure à la largeur maximale. C'est à cette étape que la vitesse est dirigée majoritairement dans le sens du plan incliné et une couche limite se forme, de part et d'autre de l'écoulement, dans laquelle la vitesse d'écoulement est très faible, voire nulle.



Figure 4-1: Comportement 'normal' d'étalement du béton frais sur le plan incliné

Il est à noter que pour certains bétons et certains angles d'inclinaison associés, l'écoulement observé est perturbé à cause d'une vitesse trop faible (première image de la Figure 4-2) ou trop importante (deuxième image de la Figure 4-2): l'écoulement n'est plus symétrique et la largeur maximale d'étalement n'est plus respectée. Dans ce cas de figure, l'écoulement n'est donc pas analysé puisqu'il est trop perturbé par la consistance du béton ou l'angle d'inclinaison. Les raisons sont multiples (béton trop visqueux pour l'angle utilisé, rapport E/C trop élevé, angle d'inclinaison trop faible, etc.), mais ce problème peut être minimisé en adaptant l'angle en fonction des caractéristiques du béton.



Figure 4-2: Comportements anormaux d'étalement du béton frais sur le plan incliné

Le premier défi proposé par ce modèle est donc de trouver l'angle optimal d'inclinaison pour l'ensemble des bétons qui vont être testés tout au long de ce projet. Bien que cette inclinaison optimale soit dépendante des deux paramètres rhéologiques qui sont la viscosité plastique et le seuil de cisaillement, le choix de se référer uniquement à l'affaissement (relié intrinsèquement au seuil de cisaillement) a été fait afin de simplifier le processus décisionnel. Finalement, en se référant au Tableau 4-1, il est possible de connaître pour un béton défini l'angle optimal d'écoulement en fonction de l'affaissement. Cette tendance a été déterminée expérimentalement en comparant les distances d'écoulement des différents essais réalisés.

Affaissement (mm)	Angle (°)
< 200 mm	20° - 30°
200-220 mm	20°
220-250 mm	10°
> 250 mm	< 10°

Tableau 4-1: Angle d'inclinaison optimal pour différentes valeurs d'affaissement

De plus, il a été observé que l'écoulement du béton frais est dépendant des propriétés rhéologiques du fluide (τ_0 , $\dot{\gamma}$ *et n*), de l'inclinaison du plan (θ), des dimensions et de la masse du réservoir. Ces paramètres physiques du modèle (angle d'inclinaison et dimensions du réservoir) seront constants tout au long des expériences afin de faire uniquement varier les propriétés rhéologiques des différents bétons.

4.1.2. Captation vidéo

Une fois l'angle d'inclinaison optimal choisi, la boîte de confinement est remplie de béton frais, la trappe est ouverte et une captation vidéo de l'écoulement du béton est réalisée. Selon le protocole expérimental, une caméra est placée parallèlement au plan incliné et une autre est perpendiculaire à ce même plan. Ces caméras permettent de suivre l'évolution du béton frais en fonction du temps selon ces deux points de vue. À la fin de l'écoulement, une photographie de l'empreinte du béton est prise avant et après soulèvement de la boîte de confinement permettant de relever les contours laissés par le béton frais. La Figure 4-3 montre les différentes images obtenues après un essai d'écoulement valide.



Figure 4-3: Captation vidéo sur le plan incliné

Afin de traiter toutes les informations facilement et afin d'obtenir une détection automatique des contours et des vitesses d'écoulement, un traitement d'image est nécessaire. La détection automatique des contours dans ce projet prend la forme d'un programme Python qui détecte les variations de couleur des pixels présents sur l'image. L'utilisateur sélectionne alors une extrémité de l'objet à traiter et l'algorithme va se déplacer itérativement sur les pixels voisins ayant une couleur et une intensité lumineuse identique afin de former le contour du volume étudié. Lorsque la courbe tracée se referme sur elle-même, en reliant tous les pixels identiques, l'algorithme trace alors le contour et les coordonnées de tous ces points sont extraites. La Figure 4-4 représente la méthode théorique de détection des voisins rectilignes appliquée initialement par l'algorithme.



Figure 4-4: Détection automatique de contour pour 4 pixels voisins

Par ailleirus, l'outil « *Wand Tool* » du logiciel *ImageJ* s'inspire de ce principe de détection, mais permet au programme de s'intéresser aux pixels voisins étendus (en diagonale comme présenté à la Figure 4-5). Cet outil a été une grande source d'inspiration pour la suite du code mis en place puisqu'il permet une détection beaucoup plus efficace. Le code programmé pour ce projet sera donc adapté avec cette fonctionnalité afin de rendre le contour étudié plus précis.



Figure 4-5: Détection automatique de contour en diagonale pour 8 pixels voisins

Pour que cet algorithme fonctionne, l'image étudiée doit être sous format 8 bits (constitué de nuance de pixels noir et blanc). Un filtre est donc appliqué préalablement afin d'obtenir une image adaptée (Figure 4-6).



Figure 4-6: Application du filtre image

La Figure 4-7 montre l'algorithme de détection des contours pour 4 pixels voisins, appliqué aux images précédentes de l'écoulement du béton frais sur le plan incliné. Les pixels colorés en vert représentent la surface fermée détectée par le programme. Au vu de ces images, la précision de la méthode est discutable puisque l'algorithme des 4 voisins détecte mal les changements d'intensité lumineuse et les changements de surface du béton frais. Le contour est donc peu précis et le résultat obtenu n'est pas satisfaisant avec cette méthode.



Figure 4-7: Algorithme de détection pour 4 pixels voisins appliqué à l'écoulement du béton frais

En changeant l'exposition lumineuse (modification de l'angle du projecteur lumineux et de son l'intensité) et en modifiant le code pour finalement détecter les pixels voisins étendus, l'algorithme de détection est beaucoup plus efficace et les résultats obtenus sont bien plus précis (Figure 4-8).



Figure 4-8: Algorithme de détection amélioré appliqué à l'écoulement du béton frais

Dans ce cas de figure, l'algorithme détecte les pixels voisins étendus identiques et extrait la position dans l'espace d'un grand nombre de points qui représentent le contour du béton frais. Il faut alors traiter ces données afin d'obtenir un nombre acceptable de données. Deux méthodes de mesure de valeurs extrêmes sont couramment utilisées dans la littérature scientifique: la valeur maximale (BM pour Block Maxima) et le dépassement de seuil (POT pour Peaks Over Treshold). Des modèles statistiques fiables sont utilisés dans ces deux méthodes et permettent de déterminer les valeurs extrêmes d'une série et d'en tirer les valeurs intéressantes. Ces deux modèles sont tous deux statistiquement valides et sont équivalents en termes de performance. La méthode choisie tout au long de ce projet est la première méthode: la valeur maximale ou BM. Elle permet d'obtenir la valeur maximale et minimale d'une série de données en choisissant la période d'échantillonnage. Concrètement elle permettra de ne retenir que les points qui sont réellement sur le pourtour de l'empreinte de béton sur les images de la Figure 4-8. Pour chaque intervalle, dont la taille est déterminée par la période d'échantillonnage, une valeur maximale et minimale des données est extraite et l'opération est répétée sur tous les intervalles. Les valeurs maximales correspondent au contour supérieur du béton frais tandis que les valeurs minimales, le contour inférieur. Puisque cette méthode est la plus adaptée dans le cadre de cette étude, elle sera donc préférée. La Figure 4-9 présente un exemple de traitement de données effectué à l'aide de ce modèle mathématique.



Figure 4-9: Valeurs maximales pour la méthode BM – image adaptée de l'article sur la fonction « pyextreme » de Python

Finalement, ces différents traitements d'image et de données permettent d'extraire du logiciel les résultats qui semblent intéressants lors de cette expérience. La Figure 4-10 illustre l'empreinte de différents bétons, selon la normale à l'écoulement, après écoulement pour un angle d'inclinaison de 20 degrés. Cette empreinte est la première donnée extraite lors de l'expérience et est appelée la ligne de contact du béton frais.



Figure 4-10: Empreinte vue du haut du béton frais

Les caractéristiques des trois bétons étudiés dans la figure précédente sont énumérées dans le Tableau 4-2. Il est important de noter que les essais d'affaissement et de mesures rhéologiques sur rhéomètre ont été réalisés trois fois afin d'obtenir une moyenne fiable.

Composition	Béton 1	Béton 2	Béton 3
Ciment [kg]	30	30	30
Gros Granulats [kg]	80	80	80
Granulats fins [kg]	60	60	60
Superplastifiant (Eucon 37)[mL]	100	100	100
Retardateur de prise (Delvo) [mL]	100	100	100
Eau [L]	13.87	14.14	14.41
Rapport E/C	0.46	0.47	0.48
Affaissement [mm]	225	200	210
Seuil de cisaillement [Pa] (rhéomètre ICAR)	145	358	315
Viscosité [Pa.s] (rhéomètre ICAR)	33.7	30.9	25.6

Tableau 4-2: Caractéristiques des bétons utilisés

Ce premier graphique montre bien la différence d'écoulement et l'écart des lignes de contact entre les différents bétons frais étudiés. Puisque les valeurs de seuil de cisaillement, de viscosité et d'affaissement sont éloignées pour ces trois bétons, les écoulements observés sont donc logiquement divergents. De plus, les deux données intéressantes qui peuvent être extraites de cette expérience sont la largeur maximale d'écoulement du béton ainsi que la distance entre le front de progression de la ligne de contact du béton et la paroi de la boîte de confinement (Figure 4-11).



Figure 4-11: Valeurs caractéristiques de l'écoulement sur plan incliné

La première hypothèse proposée est que la valeur d'affaissement du béton exerce une influence sur l'écoulement en surface libre: en d'autres termes, la distance parcourue par le front de progression du béton frais est explicitement reliée à l'affaissement. À première vue, plus la valeur d'affaissement est élevée, plus la ligne de contact sera distante dans le sens de l'écoulement de sa position initiale et donc plus le béton frais s'écoulera le long du plan incliné. D'après la Figure 4-12 et après de nombreux tests, une relation mathématique, dans cette plage d'affaissement semble peu fiable (entre ces deux paramètres), mais une tendance semble se dégager.



Figure 4-12: Distance du front de progression en fonction de l'affaissement

Bien que la plage d'étude soit assez limitée (entre 190 et 230 mm), lorsque l'affaissement augmente, la distance parcourue par le front de progression augmente. La relation linéaire entre les deux paramètres semble peu précise ($R^2 = 0.71$), cependant, les différents écarts de mesure observés peuvent s'expliquer par les nombreuses imprécisions de mesures et de manipulation humaine (voir section 5.1.2). Cette partie souligne donc l'imprécision reliée à la mesure d'affaissement et finalement l'importance de la mesure des propriétés rhéologiques d'un béton frais afin de caractériser son comportement et son écoulement. Par exemple, deux bétons avec un affaissement similaire sont considérés comme identiques en chantier (i.e. même affaissement) mais peuvent présenter des valeurs rhéologiques

divergentes et ainsi proposer des schémas d'écoulement différents. Il est donc primordial de caractériser un béton frais à l'aide de ses propriétés rhéologiques: le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité, qui peuvent être déterminés à l'aide d'un rhéomètre. D'un autre côté, la largeur maximale d'étalement ne semble pas dépendre de la valeur obtenue lors de l'essai d'affaissement. Comme montré sur la Figure 4-13, aucune tendance ne semble être trouvée entre l'affaissement et la largeur maximale d'étalement pour ces types de béton.



Figure 4-13: Largeur maximale d'étalement en fonction de l'affaissement

Dans un second temps, l'observation puis l'identification de différents profils d'écoulement en fonction du temps semblent très intéressantes à exploiter. Comme identifié par la littérature scientifique lors des différents essais réalisés sur de la boue, de la lave, du gel de Carbopol et finalement du béton frais, différents régimes sont clairement identifiés dans l'écoulement de ces fluides. La Figure 4-14 et la Figure 4-15 tracent alors l'évolution, au cours du temps, de la forme adoptée par le béton frais (vue latérale). Le béton étudié est le béton 1 présenté dans le Tableau 4-2. D'un autre côté, la Figure 4-16 présente l'écoulement, vue du haut, de ce même béton entre 0 et 3 secondes d'expérience. Ces graphiques permettent donc de comparer les profils et schémas d'écoulement d'un même fluide en fonction du temps. Deux régimes sont clairement identifiables. En premier lieu, l'écoulement est dans une phase rapide de propagation, où la vitesse du front de progression est

élevée et constante. Par la suite et assez brusquement, un régime de pseudoéquilibre apparaît dans lequel la vitesse du volume de béton frais diminue progressivement en fonction du temps. Le béton étant assez fluide, aucun arrêt total de l'écoulement n'est observé pour ce cas de figure avant d'avoir atteint l'extrémité du plan incliné. Cependant, pour certains bétons, la vitesse diminue jusqu'à un total arrêt de l'écoulement. C'est alors qu'un régime d'écoulement stable et immobile est observé avant d'avoir atteint l'extrémité du plan incliné.



Figure 4-14: Empreinte latérale du béton frais entre 0 et 0.8 seconde

La Figure 4-14 illustre bien la première étape rapide d'écoulement: l'écart entre deux prises de mesure est important dans les premiers instants (entre 0 et 0.5 seconde) et diminue aux alentours de 1 seconde d'écoulement. L'intervalle de prise de mesure est de 0.2 seconde entre chaque image (imposé par le temps d'exposition de la caméra). Le mouvement du volume de béton frais est particulièrement rapide lors de cette étape (le béton se déplace rapidement par inertie).



Figure 4-15: Empreinte latérale du béton frais entre 1.0 et 2.0 secondes (suite de la Figure 4-14)

La Figure 4-15 présente la deuxième étape de propagation du béton frais: le fluide se déplace plus lentement et la vitesse de propagation du fluide diminue avec le temps. L'intervalle de prise de mesure pour ce graphique est encore une fois de 0.2 seconde entre chaque image.



Figure 4-16: Vue du haut de l'empreinte du béton frais

Des constatations similaires sont observables avec la vue du haut de l'empreinte.

Comme énoncé précédemment, le comportement initial du béton frais lors de l'ouverture de la trappe amène une vitesse d'écoulement rapide. Ce régime initial d'écoulement est dominé par les forces d'inertie et les forces de pression hydrostatiques puisque le béton se met en mouvement brusquement à cet instant (Balmforth et al., 2002; Cochard & Ancey, 2009; Nikitin et al., 2011). Sur les figures précédentes, entre 0 et 0.8 seconde, l'écoulement est rapide et hétérogène. Après une seconde, indépendamment de la pente et de la composition du fluide, l'écoulement se transforme en un régime quasi équilibré, où les forces gravitationnelles et visqueuses entrent en jeu. L'écoulement devient alors régulier et uniforme. De plus, les vitesses de progression diminuent graduellement en fonction du temps. Une autre observation intéressante est que l'étalement latéral se produit uniquement dans les premiers instants, où l'inertie est dominante, puis devient négligeable dans la phase suivante. En raison du seuil de cisaillement, une partie du fluide arrête complétement de se mouvoir sur les bandes latérales formant ainsi des zones latérales d'écoulement nul. Finalement, puisque la quantité de fluide mis en mouvement est limitée, la vitesse du front de progression diminue graduellement et l'écoulement s'arrête sur le plan incliné pour certains bétons.

Ces différentes observations de comportement sont précieuses et permettront d'adapter le modèle en fonction de l'écoulement réel et ainsi améliorer et rendre plus réaliste la simulation numérique.

4.1.3. Comparaison d'un béton identique

Afin de tester la validité du protocole expérimental et la répétabilité de l'essai, il est intéressant de comparer les différentes mesures entre elles. La largeur maximale de l'empreinte et la position du front de progression à la fin de l'écoulement seront comparées pour des bétons identiques. Le meilleur moyen d'évaluer la précision, la sensibilité, la répétabilité et la robustesse du processus expérimental est de répéter les expériences et comparer les résultats obtenus. Un exemple de résultats obtenus pour un béton identique, testé trois fois successivement sur le plan incliné et sous les mêmes conditions expérimentales est présenté à la Figure 4-17. Les compositions des bétons utilisés pour cet exemple sont renseignées dans le Tableau 4-3.



Figure 4-17: Étalements de bétons similaires sur le plan incliné à 20°

Composition du béton	Béton
Ciment [kg]	30
Gros Granulats [kg]	80
Granulats fins [kg]	60
Super plastifiant (Eucon 37)[mL]	100
Retardateur de prise (Delvo) [mL]	120
Eau [L]	14.4
Rapport E/C	0.48
Affaissement [mm]	210

Tableau 4-3: Composition du béton utilisé

Pour un béton fluide (entre 210 et 250 mm d'affaissement), l'écoulement semble être répétable puisque les traces laissées par l'écoulement du béton frais sont sensiblement identiques. L'erreur relative calculée estime le pourcentage d'écart entre les valeurs les plus éloignées mesurées pour la largeur maximale d'étalement et la distance parcourue par le front de progression.

Donnée mesurée	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Erreur relative [%]
Demi – largeur maximale d'étalement [m]	0.168	0.165	0.17	4.1
Distance du front de progression [m]	0.805	0.801	0.807	

Tableau 4-4: Comparaison des différents écoulements pour un béton identique

Le Tableau 4-4 permet donc de comparer l'erreur relative de ces valeurs pour un même béton. Les erreurs liées à la manipulation humaine (vitesse de soulèvement de la trappe variable, compaction des trois couches de remplissage non homogène, état visqueux variable du plan incliné) sont présentes sur le modèle expérimental et peuvent expliquer les différents écarts possibles. La conclusion de cette expérience est que pour un béton identique, testé trois fois en série, la largeur maximale, la distance parcourue par le béton et donc l'écoulement sur plan incliné semble identique et peu variable (variation maximale de 4.1% entre les données).

4.1.4. Influence du soulèvement de la boîte de confinement

À la lumière de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, la surface de confinement (le cône en acier pour l'essai normalisé et la boîte de confinement en bois pour ce test) se déplace pendant l'essai en libérant le béton frais. Afin de pouvoir extraire à l'aide du programme Python le contour précis du béton frais, la boîte de confinement est soulevée à la fin de l'expérience, lorsque le béton a fini de s'écouler sur le plan incliné. Ce soulèvement a pour effet la création de nombreuses interactions entre le fluide et la surface en mouvement et donc de remettre le volume de béton frais dans un bref état d'écoulement. En effet, lors de cette étape, les forces de friction et autres forces liées au contact de deux matériaux ont pour effet de remettre en mouvement pour un court instant le béton frais et donc de modifier son empreinte finale. La Figure 4-18 présente cette différence d'empreinte.



Figure 4-18: Effet du soulèvement de la boîte de confinement pour deux bétons fluides

Lorsque la surface intérieure de la boîte se soulève, une certaine adhérence entre la pâte de ciment, les granulats et la surface en bois est observée et l'ensemble de la structure cimentaire est légèrement déplacée. L'ordre de grandeur de ce déplacement se situe entre 5 et 10 % par rapport à la position initiale de l'empreinte avant soulèvement (Figure 4-19). La première observation est que la largeur maximale de soulèvement est peu ou pas impactée lors de cette étape de soulèvement. Cependant, comme illustré précédemment, la distance parcourue par le front de progression augmente lors du soulèvement de la boîte.





Figure 4-19: Différence d'empreinte avant et après soulèvement de la boîte pour deux bétons fluides

Dans la plage d'affaissement sélectionnée dans ce projet, la distance parcourue par le front de progression est la valeur la plus affectée par le soulèvement de la boîte. Une variation entre 5 et 10 % est observée pour le front de progression et une variation maximale de 3 % pour la largeur maximale d'étalement (Tableau 4-5).

Donnée mesurée	Essai 1	Essai 2	Écart relatif [%]	
Demi – largeur maximale d'étalement avant soulèvement [m]	0.18	0.159	27	2 4 5
Demi – largeur maximale d'étalement après soulèvement [m]	0.185	0.163	2.7	2.45
Distance du front de progression avant soulèvement [m]	0.74	0.595	0.2	67
Distance du front de progression après soulèvement [m]	0.815	0.6375	9.2	0.7

Tableau 4-5: Comparaison de l'empreinte avant et après soulèvement de la boîte

Cette observation illustre l'importance des forces de friction et du contact entre le fluide et la surface en mouvement. La première conclusion tirée de cette expérience est que la mesure des différents paramètres d'écoulement sera rapportée avant le soulèvement de la boîte. Dans un second temps, ce soulèvement est similaire à l'étape de soulèvement du cône d'Abrams, où le béton est en contact direct avec une surface en mouvement. Ce paramètre n'étant pas pris en compte dans les différents modèles numériques réalisés, il permettra ultimement d'affiner les

simulations et de complexifier les modèles d'écoulement et ainsi mieux visualiser les différences entre la théorie et la pratique. Cette hypothèse permet finalement une bonne transition avec la section suivante qui est la présentation des simulations numériques.

4.2. Résultats numériques

Comme présenté à la section 2.4.2, le modèle numérique consiste à la libération soudaine d'un volume de fluide défini sur un plan incliné d'un angle de 20 degrés. Le fluide tente de représenter l'écoulement du béton 1 défini dans le Tableau 4-2. Pour définir un fluide de Bingham, le logiciel exige les propriétés rhéologiques du béton frais: le seuil de cisaillement qui a une valeur de 145.02 Pa pour ce cas de figure et la viscosité plasitque une valeur de 33.8 Pa.s. La Figure 4-20 représente le profil latéral de l'écoulement du béton aux premiers instants de l'expérience.



Figure 4-20: Évolution latérale du béton frais à 0, 0.2, 0.4 et 0.6 seconde

Comme observé expérimentalement, la vitesse augmente brusquement au début de l'écoulement. Le front de progression est la partie la plus rapide du fluide et augmente grandement entre 0 et 0.5 seconde. La vitesse maximale observée est de

0.78 m/s. À partir de 0.5 seconde d'écoulement, la vitesse se stabilise puis décroit progressivement en fonction du temps. L'observation concrète de deux étapes de propagation est alors en accord avec la partie expérimentale. La différence de vitesse de propagation avant (Figure 4-21) et après (Figure 4-22) 0.5 seconde d'écoulement est notable. La première figure montre la différence rapide de contour à 0.1 seconde d'intervalle tandis que la deuxième figure montre la progression plus lente du béton à 0.2 seconde d'intervalle.

Vitesse du fluide en $x\left(\frac{m}{s}\right)$



Figure 4-21: Première étape de propagation – Vue latérale



Figure 4-22: Deuxième étape de propagation – Vue latérale

En se plaçant sur une vue du dessus, les mêmes observations sont faites (Figure 4-23 et Figure 4-24). La vitesse de propagation entre 0 et 0.5 seconde est instable et nettement supérieure à la vitesse entre 0.5 et 1.1 seconde d'écoulement. Des observations similaires à la partie expérimentale sont donc mises en valeur grâce à ces nombreuses figures. Le béton frais modélisé est, du point de vue des profils d'écoulement, réaliste et le modèle est validé.



Figure 4-23: Première étape de propagation – Vue du dessus



Figure 4-24: Deuxième étape de propagation – Vue du dessus

Pour conclure, des étapes similaires sont observées entre la partie numérique et expérimentale. Bien que les variations de vitesse soient similaires, le temps de transition entre les deux étapes est tout de même différent. Cette variation peut s'expliquer par les différents écarts entre les modèles. Premièrement, la trappe d'ouverture n'est pas simulée et cette dernière exerce une influence sur l'écoulement

expérimental. Dans un second temps, la précision de la caméra haute vitesse ainsi que la précision du traitement vidéo peuvent être remise en question par rapport à la précision du logiciel de calcul numérique. Cependant, la modélisation numérique réalisée est donc validée du point de vue des profils d'écoulement pour ce béton. Le modèle numérique développé tout au long de cette section permet donc de bien gérer l'écoulement d'un fluide de Bingham, notamment grâce à la mise en place du critère de seuil de cisaillement tridimensionnel et de la limitation de l'expansion radiale numérique. Ces deux critères permettent d'observer un départ et surtout un arrêt du mouvement de la masse de béton frais étudiée.

4.2.1. Identification des zones d'écoulement

De plus, le modèle numérique permet de séparer la composante vitesse en une valeur axiale (\vec{x}) et radiale (\vec{y}). Cette décomposition permet donc de tracer le champ des vitesses pour ces deux données (Figure 4-25). Sur ces images, le flux et les vitesses sont symétriques par rapport à l'axe central et la transition de la couleur bleue à la couleur rouge indique une augmentation progressive de vitesse.



Figure 4-25: Vitesses d'écoulement axiales (haut) et radiales (bas) à t = 5.0 s

Après observation des résultats numériques, la première hypothèse qui peut être tirée est que les zones situées près de l'axe possèdent une vitesse axiale beaucoup plus élevée que leur vitesse radiale. L'écoulement dans cette zone, appelée zone linéaire, est symétrique. La vitesse axiale décroit progressivement après 0.5 seconde d'écoulement pour cette zone qui représente aussi le front de progression numérique. Finalement, ces différentes observations se retrouvent inversées pour les zones éloignées de l'axe. En effet, les zones, appelées zone limite d'écoulement sur la Figure 4-26, possèdent une vitesse radiale plus élevée que leur vitesse axiale. Il s'agit des zones où sont relevés expérimentalement des vitesses d'écoulement très faibles, voire nulles et où l'écoulement semble plus faible. L'étude réalisée sur l'écoulement des bétons frais sur une surface inclinée (Chi et al., 2021) corrobore cette observation et souligne la présence d'une couche limite externe correspondant à une zone limite où le taux de cisaillement $\frac{dx}{dy}$ est le plus élevé et où les vitesses d'écoulement se vitesses d'écoulement sense sense le plus élevé et où les vitesses d'écoulement sense le plus élevé et où les vitesses d'écoulement des vitesses d'écoulement des vitesses d'écoulement des bétons frais sur une surface inclinée (Chi et al., 2021) corrobore cette observation et souligne la présence d'une couche limite externe correspondant des vitesses d'écoulement sense le plus élevé et où les vitesses d'écoulement des v



Figure 4-26: Zones d'écoulement du béton frais

Ces surfaces, situées de chaque côté de l'écoulement, présentent des vitesses expérimentales d'écoulement faibles, voire nulles. Cependant, la constatation de ces zones de non-écoulement n'est pas observée numériquement. De plus, la forme de l'empreinte, l'épaisseur de pâte ainsi que certaines caractéristiques

d'écoulements divergent des différents résultats expérimentaux. Après observation de nombreux résultats numériques, la méthode de calcul employée par Flow3D Hydro autorise le fluide à s'étendre radialement sans point d'arrêt. En effet, le calcul théorique d'un fluide homogène, sans phase granulaire et sans la présence d'un coefficient de friction entre la phase granulaire et le plan incliné, donne lieu à un écoulement radial illimité du béton frais. La mise en place d'une limitation numérique à l'expansion radiale est donc nécessaire afin de reproduire l'écoulement du béton frais avec la méthode VOF. Pour cela, un arrêt du maillage radial a été mis en place à 20 cm de l'axe central puisque cette valeur correspond à la largeur maximale d'écoulement expérimentale observée pour un tel béton. La largeur maximale numérique est donc limitée dans les futures simulations et n'est plus un moyen de comparaison avec la partie expérimentale. Pour conclure après cette modification, la distance parcourue par le front de progression expérimental et numérique est identique au bout de 3 secondes d'écoulement: 0.8 m. Une campagne de simulations numériques et expérimentales de différents bétons frais entre 200 et 250 mm d'affaissement a été réalisée. Par exemple, la Figure 4-27 compare l'écoulement observé expérimentalement et l'écoulement numérique à différents temps d'étude pour le béton 1 du Tableau 4-2.



Figure 4-27: Comparaison des écoulements expérimentaux et numériques

Le temps d'écoulement et la distance parcourue par le front d'écoulement sont expérimentalement et numériquement très proches. Du point de vue de ces caractéristiques, l'écoulement est similaire. Cependant, aucun lien entre la largeur maximale d'étalement pour les deux méthodes n'est trouvé. Afin de rendre la simulation numérique plus réaliste, une limitation manuelle de cette largeur maximale est nécessaire (identique à celle réalisée précédemment) pour chaque cas de figure. Une solution potentielle à ce problème d'expansion numérique infinie est proposée dans le chapitre de conclusion (chapitre 6). Finalement, l'écoulement final (t=3.0 s) est similaire et comparable entre les deux méthodes et constitue une bonne base pour la suite de ce projet.

4.3. Conclusions

L'analyse de l'écoulement et l'analyse du profil d'étalement en surface libre du béton frais ont été effectuées, sur un plan incliné simple à angles variables. En utilisant plusieurs méthodes de traitement d'images, le protocole expérimental a permis de reconstruire avec précision l'évolution de la surface libre de volumes fixes de fluide libérés soudainement. Entre chaque essai, le comportement observé était pratiquement identique: à court terme, la masse fluide accélère grandement au moment de l'ouverture de la trappe et atteint très rapidement une vitesse constante. Après une seconde d'écoulement, indépendamment de l'inclinaison du plan et des propriétés du béton, le fluide atteint un régime de quasi-équilibre où la vitesse diminue graduellement en fonction du temps. Le modèle numérique traduit lui aussi la présence de deux phases d'écoulement, uniquement le temps de transition semble s'éloigner de la réalité. Il est à noter que tout au long de cette expérience et afin de simplifier le problème, la totalité du fluide est libérée instantanément, c'està-dire que le temps nécessaire à l'ouverture de la trappe a été négligé. Pour de futures expériences, il peut être intéressant de modéliser également l'ouverture progressive de cette trappe afin de simuler les forces de friction entre la porte en mouvement et le fluide étudié. Cette hypothèse pourrait être bénéfique pour le modèle numérique et pour la comparaison avec les résultats expérimentaux. Dans un second temps, les paramètres physiques principaux de l'écoulement ont été

mesurés: la largeur maximale d'étalement et la distance parcourue par le front de progression. Peu après avoir atteint la largeur d'étalement maximale, le béton continue de s'écouler avec cette largeur d'étalement fixe. De plus, dans le même temps, la profondeur de l'écoulement diminue progressivement jusqu'à être parallèle au plan incliné. Les comparaisons expérimentales et numériques de la largeur maximale d'écoulement et la position du front de progression ont permis de raffiner et rendre plus réaliste la simulation d'écoulement. Finalement, ce modèle est la première étape pour une modélisation de l'écoulement du béton frais à l'intérieur d'une toupie de malaxage. Pour affiner encore plus les simulations et les rendre plus réalistes, un plan d'expérience à plusieurs variables (seuil de cisaillement, viscosité, angle d'inclinaison, rapport E/C, etc.) pourrait être mis en place afin de comprendre l'influence de chaque paramètre sur l'écoulement en surface libre du béton frais et ainsi optimiser et adapter le logiciel à chaque cas de figure rencontré. Pour conclure, afin de comprendre l'impact de la première variable qui est le seuil de cisaillement sur le mouvement du béton frais, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est le modèle le plus adapté et le plus simple à étudier. Cette hypothèse sera donc centrale dans le chapitre suivant. Le modèle d'écoulement sur plan incliné est donc une porte d'entrée vers le modèle bien plus complexe qu'est la modélisation de béton frais à l'intérieur d'une toupie de malaxage.

Chapitre 5 : Modélisation de l'écoulement du béton frais lors de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams - Cas 3

En chantier, l'essai d'affaissement est répandu pour le contrôle qualité du béton, car il est simple d'utilisation et peu cher. La hauteur d'affaissement ou plus concrètement la différence de hauteur avant et après écoulement est une valeur empirique et simple à déterminer plutôt qu'un paramètre physique fondamental. Cette donnée permet de définir rapidement le béton en termes de consistance et de maniabilité, mais il s'agit-là d'un critère peu précis, variable et extrêmement sensible aux erreurs liées à la manipulation humaine. Afin de mieux caractériser le comportement du béton frais lors d'un écoulement, des appareils de mesures rhéologiques sont alors employés pour déterminer les propriétés rhéologiques du fluide étudié. La mesure de ces propriétés rhéologiques, comme le seuil de cisaillement et la viscosité plastique grâce aux différents rhéomètres, permettent une meilleure quantification de la consistance et la maniabilité du mélange. De plus, ces deux paramètres sont des éléments clés à la compréhension de l'écoulement et du comportement du béton frais en mouvement.

De plus, la littérature scientifique relie empiriquement la hauteur d'affaissement avec le seuil de cisaillement et étaye cette hypothèse à l'aide de simulations numériques (Hoornahad & Koenders, 2012; Li et al., 2022; Němeček, 2021; Roussel, 2006; Schowalter & Christensen, 1998). Les sections suivantes s'inspirent donc des modèles numériques déjà mis en place par les différents chercheurs. Finalement, les prochaines simulations et expériences étudiées dans ce chapitre tentent de démontrer une relation expérimentale et numérique entre ces deux paramètres physiques qui sont le seuil de cisaillement et l'affaissement. La comparaison du modèle avec la réalité va encore une fois affiner le modèle global de l'écoulement du béton frais et le rendre plus réaliste et fidèle à la réalité.

5.1. Résultats expérimentaux

Cette section va traiter des différents résultats expérimentaux obtenus lors des campagnes expérimentales au laboratoire de l'Université Laval. Les différents

mélanges étudiés, la captation vidéo de l'écoulement du béton frais et finalement la relation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement seront évoqués dans les paragraphes suivants.

5.1.1. Protocole expérimental

Après un malaxage suffisant (à l'aide d'un malaxeur stationnaire rotatif) d'une durée de 10 à 15 min entre chaque essai afin de rendre le mélange homogène, le béton est immédiatement testé 3 fois simultanément à l'aide de l'essai au cône d'Abrams normalisé. Cette répétition de l'essai permet d'obtenir une valeur d'affaissement moyenne valide. Le déroulement de l'essai, les étapes expérimentales, le remplissage du cône ainsi que son soulèvement sont en accord avec le protocole défini par la norme CSA A23.2 (RMCAO, 2013). La Figure 5-1 illustre le déroulement de cet essai.



Figure 5-1: Essais d'affaissement au cône d'Abrams

Pendant les essais, une captation vidéo horizontale a été réalisée afin de suivre l'évolution en fonction du temps de l'affaissement et de la vitesse du béton frais lors de cette expérience (Figure 5-2).



Figure 5-2: Captation vidéo de l'essai d'affaissement

De plus, lorsque l'écoulement s'arrête, une photographie de l'empreinte du béton vue du haut est réalisée afin de quantifier la largeur d'étalement. La détection automatique du contour ainsi que le traitement d'images et des données employé sont similaires au protocole mis en place dans le chapitre précédent (voir section 4.1.2). Il est important de noter que les mesures fournies par cette expérience sont particulièrement sensibles à l'exposition lumineuse ainsi que l'angle de mesure de la caméra. Afin de s'affranchir de ces problèmes, la caméra est donc fixée sur un trépied immobile tout au long des essais et un projecteur à haute intensité lumineuse est employé. En parallèle de l'essai d'affaissement, le béton est placé immédiatement dans un rhéomètre ICAR et la mesure du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique est réalisée trois fois successivement.

5.1.2. Lien entre affaissement et seuil de cisaillement

Les différentes références scientifiques (Hu et al., 1996; Kabagire, 2018; Murata & Kikukawa, 1992; Roussel & Coussot, 2005; Schowalter & Christensen, 1998; Wallevik J., 2006) tentent de démontrer une relation entre l'affaissement et le seuil de cisaillement du béton. Ces différentes équations, énumérées dans l'annexe B, permettent de prédire l'évolution du seuil à l'aide de l'affaissement d'un béton frais. En illustrant les courbes de ces nombreux modèles, la Figure 5-3 montre bien qu'un lien existe entre ces deux paramètres et que dans certains intervalles d'affaissement, les relations semblent cohérentes entre elles. Cette cohérence est d'autant plus démontrée lorsque l'affaissement est situé entre 200 et 300 mm. D'un autre côté, les courbes théoriques semblent diverger pour des valeurs d'affaissement faibles, notamment entre 0 et 150 mm. Cette disparité semble s'expliquer par les différentes hypothèses posées par les modèles. Chaque équation est valide et réaliste pour une plage d'affaissement donnée et chaque modèle tente de décrire au mieux un type de béton. De plus, les valeurs d'affaissement de bétons fluides sont plus simples à prédire que pour des bétons plus raides: c'est donc pour cela que les relations mathématiques proposées sont plus précises lorsque l'affaissement se situe entre 200 et 300 mm. La Figure 5-3 appuie donc cette théorie.



Figure 5-3: Relation théorique entre l'affaissement et le seuil de cisaillement

Afin de rendre plus simple l'exploitation expérimentale de ces relations et de s'affranchir des unités, la littérature définit des valeurs adimensionnelles d'affaissement et de seuil de cisaillement: respectivement notés *s*' et τ'_0 (Li et al., 2022; Roussel, 2006; Roussel & Coussot, 2005):

$$s' = \frac{s}{H_0} \tag{5.1}$$

$$\tau'_{0} = \frac{\tau_{0}}{\rho. g. H_{0}} \tag{5.2}$$

où H₀ représente la hauteur initiale du cône d'Abrams

Les courbes précédentes peuvent donc être adaptées afin de pouvoir comparer aisément les différents essais et leurs résultats (par exemple entre le cône d'Abrams ASTM et le mini-cône). La Figure 5-4 trace les différentes relations empiriques adimensionnelles entre le seuil de cisaillement et l'affaissement des bétons frais. Cette courbe théorique est un outil de comparaison efficace et permet de valider ou non les différents résultats expérimentaux qui sont présentés dans les paragraphes suivants. Il est à noter qu'une échelle logarithmique est utilisée dans les prochains graphiques afin de mieux représenter les ordres de grandeur et mieux représenter le grand nombre de valeurs présenté.



Seuil de cisaillement adimensionnel

Figure 5-4: Relation théorique entre l'affaissement adimensionnel et le seuil de cisaillement adimensionnel

Les résultats expérimentaux, obtenus lors les campagnes de comparaison des différents rhéomètres de la littérature scientifique (Banfill et al., 2000; Ferraris et al., 2003), sont représentés sur la Figure 5-5. Ces courbes représentent les résultats fournis par différents rhéomètres et permettent une comparaison plus poussée des résultats obtenus lors des campagnes expérimentales réalisées au sein du laboratoire. Les résultats des rhéomètres *BML*, *BTRHEOM* et du *Two-Point Test* sont illustrés à la figure suivante.



Figure 5-5: Relation adimensionnelle entre l'affaissement et le seuil de cisaillement – données obtenues dans la littérature (Banfill et al., 2000; Ferraris et al., 2003)

Il est important de constater qu'il n'existe actuellement aucun moyen de déterminer la valeur réelle du seuil de cisaillement. Au cours des différentes expériences et des différentes campagnes, les nombreux rhéomètres employés n'ont pas obtenu les mêmes résultats pour un même béton testé. En effet, pour un béton similaire, les différents rhéomètres donnent un seuil de cisaillement plus ou moins précis. Cela ne signifie pas que tous les rhéomètres sont mal conçus ou peu réalistes, mais plutôt qu'aucun d'entre eux n'est précis sur toute la plage du seuil de cisaillement évaluée (Roussel, 2006). Cependant, à partir des courbes obtenues, une ou des tendances sont facilement observables: une relation forte existe bien entre le seuil de cisaillement et l'affaissement d'un béton frais d'un point de vue de la mesure donnée par les rhéomètres. Cette hypothèse se confirme facilement à l'aide des courbes précédentes et est particulièrement applicable pour un béton dont l'affaissement se situe entre 180 et 250 mm. C'est donc pour cela que les résultats obtenus lors des campagnes expérimentales menées au laboratoire de l'université Laval se concentrent sur des bétons dont l'affaissement est situé dans cet intervalle. La Figure 5-6 présente des valeurs adimensionnelles d'affaissement et de seuil de cisaillement obtenues lors de ces campagnes expérimentales à l'aide du rhéomètre ICAR présent au laboratoire. Trois campagnes d'essais ont été réalisées pendant lesquelles dix échantillons de béton frais ont été étudiés. Pour chaque échantillon, une valeur moyenne de l'affaissement et du seuil de cisaillement a été retenue. Une relation mathématique forte est démontrée grâce à ces expériences. Les résultats sont présentés à la Figure 5-6. D'un côté, le coefficient de corrélation de ces différentes courbes est en accord et se rapproche grandement du coefficient déterminé expérimentalement par Banfill et al. (2000; 2003). De l'autre côté, la tendance générale de ces essais est similaire aux hypothèses théoriques et expérimentales définies par la littérature scientifique. En effet, une relation forte existe entre le seuil de cisaillement et l'affaissement d'un béton et cette relation est d'autant plus justifiée pour des bétons dont l'affaissement est situé entre 180 et 250 mm. De plus, cet essai a permis de démontrer que le modèle expérimental est répétable puisque pour un affaissement similaire, le seuil de cisaillement mesuré est sensiblement identique (voir section 5.1.4).



Figure 5-6: Relation adimensionnelle entre l'affaissement et le seuil de cisaillement – campagne expérimentale menée sur le Rhéomètre ICAR

Comme expliqué précédemment, une relation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement d'un béton frais peut être trouvée. Particulièrement dans la plage d'affaissement définie par ce projet de recherche, le lien théorique entre ces deux valeurs est démontré analytiquement par les différentes relations mathématiques, mais aussi expérimentalement à l'aide des rhéomètres. Afin de comparer les

résultats personnels et ceux obtenus par les équations empiriques, la Figure 5-7 représente, pour une plage d'affaissement comparable, les différentes courbes théoriques et les courbes expérimentales personnelles. La relation de Murata et Kikukawa est retirée de l'analyse puisqu'elle semble s'appliquer à des bétons avec des seuils de cisaillement plus élevés que ceux étudiés. La première conclusion qui peut être tirée est que malgré un décalage des valeurs d'affaissement par rapport aux relations théoriques, les tendances semblent tout de même s'accorder. À la lumière des paragraphes précédents et des différentes conclusions apportées, lorsque la hauteur d'affaissement augmente, le seuil de cisaillement semble diminuer. Cela peut donc s'expliquer par le fait que lorsque la contrainte de cisaillement à dépasser pour mettre en mouvement le béton frais (i.e. le seuil de cisaillement) est faible, la matrice cimentaire va s'étaler et le béton peut s'écouler.



Figure 5-7: Comparaison des relations entre affaissement et seuil de cisaillement entre la campagne expérimentale et la théorie

Cependant, la première limitation expérimentalement observée est que la valeur d'affaissement obtenue expérimentalement est très sensible à la manipulation et l'erreur humaine et est peu précise. D'après la norme ASTM (2020) la variation de ces valeurs d'un essai à l'autre dépend intrinsèquement de nombreux paramètres comme la teneur en eau des granulats, la température du béton, le processus de mélange, le temps d'attente et de déchargement, etc. De plus, les erreurs liées à la

manipulation humaine exercent une grande influence sur les résultats obtenus. Pour pallier ce problème, les tolérances déterminées par la norme CSA A23.1:19 (CSA Group, 2019) sont raportées dans le Tableau 5-1.

Valeur d'affaissement [mm]	Tolérance [mm]
$S \le 80 mm$	\pm 20 mm
$80 mm \le S \le 180 mm$	\pm 30 mm
$180 mm \le S$	\pm 40 mm

Tableau 5-1: Tolérance de la norme CSA A23.1:19 en termes de valeur d'affaissement

Cette tolérance signifie que, par exemple, pour un béton possédant un affaissement de 200 mm, la norme considère que l'affaissement mesuré peut se situer entre 160 et 240 mm tout en restant sensiblement identique. Malgré toutes ces imprécisions et en prenant en compte les erreurs reliées à la partie expérimentale du protocole, il est possible d'identifier une tendance commune à toutes ces courbes.

Finalement, les résultats obtenus au laboratoire à l'aide du rhéomètre ICAR semblent en accord avec les données de la littérature scientifique ainsi qu'avec les relations théoriques pour des valeurs d'affaissement comprises entre 180 et 250 mm d'affaissement. Malgré un écart remarquable entre les résultats théoriques et expérimentaux explicable par les imprécisions de mesure ainsi que par la calibration du rhéomètre, cette tendance semble tout de même valide dans la plage d'affaissement soigneusement choisie. Il est donc possible d'utiliser ces hypothèses afin de valider les modèles numériques et expérimentaux suivants et ainsi comparer les résultats simulés.

5.1.3. Captation vidéo

D'après le protocole expérimental, une caméra est placée sur un plan horizontal afin de prendre en vidéo l'écoulement du béton frais pendant l'essai d'affaissement. Après le soulèvement, à vitesse constante, du cône d'Abrams et après avoir atteint l'arrêt de l'écoulement une photographie, de la vue du dessus, est prise afin d'obtenir la trace d'étalement du béton frais étudié. Les différentes données relevées (l'affaissement, le profil d'écoulement ainsi que le diamètre d'étalement) sont utilisées comme un moyen de comparaison avec l'écoulement numérique.

5.1.4. Comparaison d'un béton identique

Dans les paragraphes précédents, un lien fort entre la hauteur d'affaissement et le seuil de cisaillement du béton frais a été démontré. Afin de prouver la répétabilité de cette expérience, plusieurs essais d'affaissement au cône d'Abrams d'un même béton sont effectués et leurs résultats sont étudiés puis comparés. La valeur d'affaissement ainsi que la demi-largeur maximale d'étalement sont les données mesurées expérimentalement. Les différents résultats sont issus d'une des campagnes d'essai réalisée, dans laquelle 4 essais au cône d'Abrams successifs sur un même béton ont été effectués. De plus, il a été montré par la littérature scientifique qu'il existe une relation étroite entre le seuil de cisaillement du matériau et le diamètre maximal d'étalement. Cet étalement est plus facile à mesurer que la hauteur d'affaissement dans le cas de hauteurs d'affaissement importantes (donc des seuils de cisaillement faibles). Il s'agit alors ici d'un autre paramètre de comparaison et d'évaluation de la répétabilité de l'écoulement étudié. Le diamètre maximal d'étalement ainsi que les profils d'écoulement sont donc des données importantes et comparables entre chaque essai. Afin d'obtenir des résultats précis, une capture rigoureuse des contours de l'étalement a été mise en œuvre permettant ainsi une analyse plus précise du diamètre de l'étalement d'un béton identique. Les différents essais d'affaissement ont été réalisés sur du papier quadrillé, les images capturées subissent le même traitement d'image et de données employé dans les chapitres précédents afin d'obtenir des résultats plus précis. Le protocole expérimental recommande d'effectuer les tests simultanément ou bien en série rapprochée afin de s'affranchir de l'influence du temps sur le comportement du béton frais. En effet, lorsque les essais sont effectués à plus de 5 minutes d'intervalle, les résultats obtenus divergent nettement les uns des autres, car les paramètres rhéologiques du béton frais évoluent très rapidement lors de cette étape. Les différentes caractéristiques du béton testé dans cette section sont définies dans le Tableau 5-2.

Caractéristiques du béton	
Ciment [kg]	30
Gros Granulats [kg]	80
Granulats fins [kg]	60
Super plastifiant (Eucon 37)[mL]	100
Retardateur de prise (Delvo) [mL]	100
Eau [L]	13.9
Rapport E/C	0.464
Affaissement moyen [mm]	205
Seuil de cisaillement moyen [Pa]	169.84
Viscosité moyenne [Pa.s]	68.2

Tableau 5-2: Caractéristiques du béton testé

L'expérience présentée dans ce paragraphe tente de comparer la répétabilité de l'essai d'affaissement d'un béton identique testé quatre fois en parallèle, i.e. au même moment. Pour ce béton, un affaissement moyen de 205 mm a été relevé et les différentes valeurs mesurées sont exposées dans le Tableau 5-3. La Figure 5.8 présente les résultats obtenus après la détection des contours sur la photographie de l'empreinte du béton frais lors de ces quatre essais d'affaissement.



Figure 5-8 : Comparaison de l'étalement d'un même béton

Les résultats obtenus entre les essais sont similaires et les diamètres d'étalement sont semblables. Du point de vue de la hauteur d'affaissement, les quatre valeurs mesurées semblent cohérentes avec la norme CSA et une erreur maximale relative
de 4.8 % est mesurée. De l'autre côté, en calculant une erreur maximale relative de la demi-largeur maximale d'étalement (le pourcentage entre les valeurs extrêmes), une valeur de 4.9% est trouvée. Ces différents résultats permettent de valider le protocole expérimental, dans ce cas de figure, puisque les résultats sont très rapprochés (Tableau 5-3).

	Demi – largeur maximale d'étalement [m]	Erreur maximale relative [%]	Hauteur d'affaissement [m]	Erreur maximale relative [%]	
Affaissement 1	0.121		0.210		
Affaissement 2	0.115	4.0	0.200	4.0	
Affaissement 3	0.119	4.9	0.205	4.8	
Affaissement 4	0.121		0.205		

Tableau 5-3: Comparaison des résultats des différents affaissements

Cependant, des erreurs liées à la manipulation humaine, la vitesse de soulèvement du cône, la compaction des couches de remplissage, l'influence du temps entre les essais ainsi que d'autres paramètres physiques ont été observées tout au long des campagnes expérimentales. En effet, ces différents phénomènes ne sont pas fondamentalement identiques entre chaque essai puisqu'ils dépendent beaucoup de la manipulation humaine qui est imparfaite. Les résultats expérimentaux sont donc variables dans ce cas de figure et rendent l'essai moins fiable, notamment lors d'une comparaison stricte avec la modélisation numérique. Il faut donc être extrêmement vigilant lors des étapes de manipulation du béton afin de s'affranchir au maximum de ces effets néfastes.

Il est à noter que la hauteur d'affaissement semble moins impactée par ces différents paramètres que la largeur maximale d'étalement dans la plage d'affaissement testée expérimentalement. Cependant, les différents résultats obtenus sur de nombreuses campagnes expérimentales poussent à croire que l'erreur relative entre chaque essai d'une même campagne est constante autour de 5%. L'essai est donc relativement fiable et sera très utile pour la suite de ce projet, car il permet de définir des valeurs physiques de l'écoulement qui seront des indicateurs de validité du modèle numérique. Finalement, ces différentes conclusions expérimentales et ces observations de l'écoulement sont des outils de comparaisons élémentaires, mais puissants et qui permettent de valider et raffiner les simulations numériques qui sont présentées dans les prochains paragraphes.

5.2. Résultats numériques

Il est intéressant de noter que toutes les approches analytiques évoquées dans les chapitres précédents impliquent une expression unidimensionnelle du critère de seuil de cisaillement et de la loi de comportement: l'écoulement se produit ou s'arrête lorsque la contrainte de cisaillement devient supérieure ou inférieure à ce même seuil de cisaillement. Les autres composantes du tenseur de contrainte ne sont pas prises en compte dans ces hypothèses. Numériquement, l'analyse et les calculs sont simplifiés: les simulations fonctionnent uniquement lorsque l'écoulement est dominé par des contraintes de cisaillement (Roussel, 2006). Le fluide simulé est décrit par un modèle élasto viscoplastique: en dessous du seuil de cisaillement, il se comporte comme un solide immobile, incompressible et viscoélastique; au-delà de ce seuil, il se comporte comme un fluide de Bingham qui s'écoule. Un modèle numérique visant à représenter l'entièreté du cône d'Abrams a été réalisé pour ce projet. La Figure 5-9 montre les résultats obtenus pour une simulation de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams à l'aide de *Flow3D-Hydro*© à 0, 0.5, 1 et 1.5 seconde d'écoulement numérique.



Figure 5-9: Simulation de l'écoulement de l'affaissement du béton avec un seuil de cisaillement 210 Pa et une viscosité plastique de 110 Pa.s

Immédiatement après le début de l'écoulement, tout le volume de fluide modélisé commence à s'écouler puisqu'aucun obstacle n'empêche le béton de se déplacer (écoulement en surface libre). En raison de l'effet d'inertie élevé, l'entièreté de la structure se met en mouvement avec une vitesse élevée croissante. De manière identique à l'écoulement sur plan incliné, la première étape d'écoulement rapide semble se terminer dans les premières secondes d'écoulement et la vitesse du fluide

diminue graduellement en fonction du temps à partir de ce moment jusqu'à devenir nulle et ainsi stopper l'écoulement. Tout au long des simulations, le plus gros problème du modèle observé se situe dans l'arrêt de l'écoulement. En effet, le critère de seuil de cisaillement tridimensionnel qui définit la frontière entre le comportement fluide et le comportement solide du béton frais numérique doit être adapté à chaque cas de figure. Des idées potentielles afin de palier à ce problème sont proposées dans le chapitre suivant (chapitre 6). Sans la mise en place de ce critère, le fluide n'arrête pas son écoulement puisque les vitesses et les profils d'écoulement se rapprochent d'une valeur nulle, sans jamais l'atteindre. Dans ce cas de figure, l'écoulement du fluide est infinitésimalement réduit sans jamais être arrêté. Un critère est donc essentiel au modèle et doit être adapté à chaque cas de figure puisqu'il permet au logiciel de comprendre le passage de l'état solide à l'état liquide du fluide simulé et inversement. Lorsque ce critère est implémenté, un arrêt d'écoulement est observé numériquement. C'est à cette étape que la hauteur d'affaissement et l'empreinte du béton sont relevées, une fois que la vitesse d'écoulement est nulle.

Cependant, le modèle numérique ne prend pas en compte physiquement l'influence du soulèvement du cône d'Abrams, appelé le moule. En effet, la vitesse de soulèvement de ce moule semble exercer une influence sur l'écoulement du béton frais (Němeček, 2021) mais n'est malheureusement pas pris en compte dans ce modèle. Une des améliorations possibles de la simulation numérique serait alors la mise en place de la surface intérieure du cône d'Abrams se déplaçant à des vitesses de soulèvement variables, afin de modéliser le plus fidèlement l'essai.

5.2.1. Lien entre affaissement et seuil de cisaillement

Pendant ce projet de recherche, dix fluides modélisés avec un seuil de cisaillement compris entre 210 et 395 Pa ont été soumis à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams numérique et les valeurs d'affaissements associées ont été relevées. Le lien entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux est très bon. La Figure 5-10 compare le seuil de cisaillement et l'affaissement obtenue lors de la

campagne de modélisation numérique et les campagnes expérimentales. En effet, lorsque le seuil de cisaillement numérique diminue, la hauteur d'affaissement augmente. Une tendance similaire aux observations expérimentales et théoriques est donc fortement observée.



Figure 5-10: Lien numérique entre l'affaissement et le seuil de cisaillement adimensionnel

Finalement, la tendance numérique pour des affaissements élevés (entre 190 et 230 mm) et donc des seuils de cisaillement faibles (entre 200 et 400 Pa) est très proche des résultats expérimentaux et théoriques. Les résultats obtenus et le coefficient de corrélation tendent à prouver que le code numérique et l'équation constitutive choisie pour représenter le comportement du matériau sont appropriés et que la relation entre les deux paramètres est valable. Le modèle numérique semble donc valide lorsque le critère du seuil de cisaillement est appliqué. L'outil numérique est donc utile afin de prédire et prévoir l'affaissement de bétons fluides à l'aide du seuil de cisaillement. Roussel (2005) va plus loin et compare numériquement et expérimentalement la relation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement pour l'essai au mini-cône d'Abrams et en tire des conclusions similaires. Les simulations numériques permettent donc bien de prédire précisément les résultats expérimentaux et de clarifier le domaine de validité des modèles théoriques. Ce paragraphe affirme et confirme la véracité du modèle numérique, notamment la précision du fluide modélisé puisque des tendances identiques aux observations

théoriques et expérimentales sont observées. Le lien entre le seuil de cisaillement et l'affaissement pour une plage précise de béton frais est donc confirmé.

5.2.2. Comparaison d'un béton identique

Afin de réduire le temps de calcul numérique et en supposant que l'écoulement lors de l'essai est symétrique, le maillage numérique est réduit au quart du cône d'Abrams. La Figure 5-11 représente le maillage modélisé ainsi que les résultats obtenus après simulation. Puisque les résultats d'une simulation d'un béton similaire seront toujours strictement identiques lorsqu'aucun paramètre numérique n'est modifié, l'étude va donc se baser sur un unique calcul numérique.



Figure 5-11: Maillage et résultat du quart de cône d'Abrams

La mesure de l'empreinte numérique d'étalement du béton frais, de la largeur maximale d'étalement ainsi que de la hauteur d'affaissement est réalisée à la fin de l'écoulement, lorsque la vitesse du fluide est nulle. Cette expérience a été réalisée sur de nombreux bétons avec un seuil de cisaillement compris entre 200 et 400 Pa et les résultats ont été comparés avec les essais expérimentaux. Les conclusions étaient sensiblement identiques sur cette plage de valeur. La première observation réalisée est que l'écoulement simulé est régulier, homogène et symétrique sur tout son diamètre. Cela signifie que la valeur du diamètre maximal d'étalement est identique sur tout le périmètre extérieur du fluide (Figure 5-12).



Figure 5-12: Comparaison de l'étalement numérique et expérimentale

En utilisant les données fournies par le béton de la section 5.1.4, ce paragraphe va tenter de prouver le lien entre la simulation et l'écoulement réel pour un béton identique. Les caractéristiques de béton étudié sont définies dans le Tableau 5-2. La hauteur finale d'affaissement numérique diffère de 5% par rapport à l'essai réel. Cet écart est acceptable au vu des différentes imprécisions de mesures énoncées dans les paragraphes précédents. De plus, les résultats obtenus pour l'étalement semblent en accord avec les résultats expérimentaux malgré une légère augmentation du diamètre maximal d'étalement numérique (Tableau 5-4). Une erreur maximale relative de la largeur maximale d'étalement de 6.2% entre les modèles a été observée pour ce béton.

Tableau 5-4: Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

	Demi — largeur maximale d'étalement [m]	Erreur maximale relative [%]	Hauteur d'affaissement [m]	Erreur maximale relative [%]	
Affaissement 1	0.121	()	0.210	4.0	
Modèle numérique	0.129	0.2	0.220	4.9	

Finalement, le modèle numérique semble simuler de manière réaliste l'écoulement du béton frais lors de l'essai au cône d'Abrams. Les résultats concernant les valeurs maximales d'étalement numériques et théoriques ainsi que la hauteur d'affaissement semblent être en accord sur la plage d'étude. La principale différence entre les modèles est la présence de gros granulats dans la matrice cimentaire expérimentale. Expérimentalement, il n'est pas rare d'observer un ou des granulat(s) en périphérie de l'empreinte du béton frais, augmentant ainsi le diamètre maximal d'étalement. Il s'agit d'une explication possible de la différence entre le modèle et les essais au laboratoire. Cette simulation est donc réaliste et exploitable à condition de définir proprement les paramètres numériques.

5.3. Conclusions et recommandations

Ce chapitre a permis de démontrer dans un premier temps la corrélation théorique et expérimentale entre l'affaissement et le seuil de cisaillement du béton frais. La bonne corrélation trouvée entre les résultats numériques obtenus et les valeurs expérimentales sur une plage précise d'affaissement confirme la validité du modèle numérique proposé et de ses conditions limites associées. Cette relation est particulièrement fiable dans la plage d'affaissement proposée: entre 190 et 230 mm. Elle permet donc d'exploiter les résultats numériques obtenus pour l'essai au cône d'Abrams afin de prédire l'affaissement d'un béton à l'aide de son seuil de cisaillement. L'essai d'affaissement apparaît donc comme un moyen simple, mais efficace, de déterminer le seuil de cisaillement d'un béton et une corrélation numérique élémentaire entre ces deux paramètres a donc été proposée. Afin d'obtenir une relation numérique fiable et globale (sur une plus grande plage d'affaissement), il faut alors tester de nombreux modèles et de nombreux bétons frais avec des seuils éloignés et enfin mesurer l'affaissement numérique obtenu. Puisque les hypothèses et les conditions d'écoulement doivent être adaptées à chaque béton frais afin de définir numériquement le moment d'arrêt d'écoulement, le modèle défini précédemment est donc l'outil optimal pour une campagne d'essai plus étendue couvrant des bétons avec des affaissements plus éloignés de cette plage choisie. Il s'agit donc d'un outil numérique puissant afin de mieux comprendre et mieux analyser l'écoulement du béton frais dans un environnement simple et apparaît, encore une fois, comme une porte d'entrée pour la modélisation numérique dans un environnement complexe: à l'intérieur d'un camion-toupie par exemple. En

effet, comme démontré tout au long de ce projet, l'utilisation d'un modèle d'écoulement simple est essentielle à la compréhension du comportement du béton dans des conditions plus complexes.

Němeček (Němeček, 2021) a modélisé différents modèles numériques prenant en compte le soulèvement du cône d'Abrams à différentes vitesses. L'écart d'affaissement entre l'exemple avec et sans le soulèvement du cône est de l'ordre de grandeur de 7 %. C'est donc pour cette raison qu'il est important de prendre en compte dans la simulation, dans les futurs modèles, ce paramètre afin d'obtenir un écoulement plus réaliste. En effet, la pâte de ciment et la matrice cimentaire semblent coller et s'accrocher au moule en acier et à toute surface en mouvement pendant l'expérience. Il faut donc ajouter numériquement la valeur réelle du frottement entre la partie fluide et la partie du solide en mouvement. Néanmoins, la quantité d'eau et la quantité d'additifs utilisées varient d'un essai à l'autre, la détermination de la valeur du coefficient sur un contact acier-pâte de ciment n'est donc pas élémentaire et complexifie encore la simulation (Němeček, 2021). Il s'agit-là d'un moyen d'amélioration du modèle qu'il faut prendre en compte afin de rendre plus réaliste la simulation.

Finalement, les effets thixotropiques n'ont pas été pris en compte dans cette étude, mais peuvent affecter les données de manière significative (Baudez et al., 2002) puisque le béton frais présente des phénomènes thixotropiques. Afin de raffiner encore une fois le modèle, de tels phénomènes, qui n'ont pas été considérés dans cette étude, pourraient dont être ajoutés à la simulation et ainsi rendre l'écoulement beaucoup plus réaliste et valide sur une plage de donnée plus étendue. Il s'agit ici d'une liste non exhaustive des différents éléments d'amélioration du/des modèle(s) numériques qui permettent à ce(s) dernier(s) d'être plus fidèle à la réalité. Dans le cas de figure d'un béton avec un affaissement compris entre 190 et 230 mm, le modèle numérique semble bien modéliser l'écoulement réel lors de l'essai au cône d'Abrams.

135

Conclusions et ouverture

Atteinte des objectifs

À la lumière du second chapitre, les différents objectifs définis ont été atteints. Dans un premier temps, le profil d'usure par abrasion de la sonde rhéologique a été identifié et présente de nombreux parallèles entre la partie expérimentale, théorique et les observations industrielles. La zone de la Wear Cap la plus usée provoque des turbulences dans l'écoulement et donc des zones de concentration d'usure. En effet, les forces de pression et les profils de vitesse du fluide autour de cette surface se retrouvent augmentés. C'est alors que le comportement d'un fluide élémentaire évoluant autour de la sonde a été mieux compris à l'aide des différentes expériences et des différents modèles mis en place. De plus, le calcul de la force de traînée numérique, appliquée par le fluide sur le capteur, est rendu possible par l'estimation théorique et numérique du coefficient de pression de traînée. En plus de la détermination des profils d'usure sur la surface extérieure de la sonde, la modélisation des profils d'écoulement du béton frais autour du capteur est une suite logique apportée par cette première conclusion. L'idée finale derrière ce modèle serait de comparer les paramètres physiques fournis par la sonde à l'intérieure de la toupie et de les comparer avec les données numériques afin de valider le modèle et le fluide simulé. En effet, la pression exercée par le béton frais et qui est mesurée par la sonde rhéologique réelle placée à l'intérieur de la toupie de malaxage permet une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux et ainsi de raffiner le modèle et de confirmer que le fluide modélisé est le plus réaliste possible. Dans un second temps, l'analyse de l'écoulement et du profil d'étalement en surface libre du béton frais a été effectuée sur un plan incliné. En exploitant les différentes méthodes numériques et les nombreux essais effectués selon le protocole expérimental, la comparaison entre ces approches a permis de reconstruire avec précision l'évolution, l'écoulement et le comportement d'un volume libre de fluide binghamien libéré instantanément sur un plan incliné. Les comparaisons expérimentales et numériques des différentes valeurs physiques après écoulement (la largeur maximale d'écoulement, la position du front de progression, etc.) ont permis de raffiner le modèle numérique, de rendre plus réaliste la simulation d'écoulement en surface libre du béton frais et de la calibrer. Finalement, le dernier chapitre a permis de démontrer la corrélation théorique, expérimentale et finalement numérique entre l'affaissement et le seuil de cisaillement du béton frais. Cette relation est particulièrement fiable dans une plage spécifique d'affaissement et permet d'exploiter les résultats numériques obtenus pour l'essai au cône d'Abrams afin de prédire l'affaissement d'un béton à l'aide de son seuil de cisaillement. L'essai d'affaissement apparaît alors comme un moyen simple, mais efficace de déterminer le seuil de cisaillement d'un béton et une corrélation numérique simple entre ces deux paramètres a été proposée. De plus, les profils d'écoulement et le comportement du béton frais en mouvement ont été identifiés et comparés entre les différentes méthodes. Pour conclure, cet essai a permis, encore une fois, de raffiner et calibrer le modèle numérique développé tout au long de ce projet de recherche, mais a aussi permis de simuler de manière plus réaliste l'écoulement en surface libre du béton frais.

Bilan des travaux

Les différences conclusions tirées des recherches bibliographiques et expérimentales réalisées tout au long de ce projet de recherche sont mentionnées ci-après. Les différents objectifs spécifiques ont été traités à travers les nombreux modèles étudiés.

La compréhension détaillée des zones de dégradation de la sonde rhéologique a permis de mieux caractériser les phénomènes d'usure se retrouvant sur la surface extérieure du capteur. De plus, la répartition numérique des vecteurs de vitesse et de pression ont permis de comprendre l'influence des paramètres d'écoulement sur l'usure. Finalement, ce modèle, appliqué à un écoulement plus complexe (à l'intérieur d'une toupie de malaxage) est un outil de comparaison pertinent entre le comportement numérique et réel du béton frais.

- L'observation de l'écoulement réel, la modélisation numérique simplifiée et la comparaison entre les différents modèles lors de l'écoulement du béton frais sur un plan incliné ont permis de valider la simulation numérique et de la rendre plus réaliste.
- L'observation de l'écoulement réel, la modélisation numérique simplifiée et la comparaison entre les différents modèles lors de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams du béton frais ont permis de valider la simulation numérique et de la rendre plus réaliste. Cet essai a permis d'affirmer théoriquement, expérimentalement et numériquement le lien entre le seuil de cisaillement et l'affaissement du béton frais tout en s'affranchissant d'un des paramètres rhéologiques.

Poursuite de la recherche et axes d'amélioration

L'objectif à long terme de cette recherche est de modéliser et comprendre le comportement et l'écoulement du béton frais dans des conditions complexes et se rapprochant le plus possible des conditions en chantier. Afin d'ouvrir le sujet à de futurs projets de recherche, il est possible d'imaginer, dans un ultime temps, que la toupie de malaxage d'un camion-toupie soit entièrement modélisée (Figure 0-1).



Figure 0-1: Toupie de malaxage et sonde rhéologique modélisée

Il suffit alors de modéliser un volume de béton frais à l'intérieur de cette toupie et ainsi converger la simulation numérique vers une solution plus réaliste. Puisque de nombreux résultats fournis par les sondes déjà déployées sont disponibles, une comparaison avec les courbes et les données obtenues numériquement serait donc envisageable. Comme énoncé précédemment, le système automatisé de prise de donnée fourni par *Command Alkon* permet d'obtenir un grand nombre d'informations: notamment les valeurs des pressions, des forces de traînée qu'exerce le béton frais sur la sonde, la vitesse de rotation de la toupie, la position de la sonde en tout temps, etc. Le système est déployé sur de nombreux camions de malaxage en Amérique du Nord et un exemple observé à Québec est montré à la Figure 0-2.



Figure 0-2: Camion de malaxage Béton Provincial équipé du système de sonde rhéologique

Ces résultats expérimentaux peuvent être comparés avec les données numériques fournies par le logiciel. En effet, le modèle numérique permet de calculer les différentes forces et pressions que le fluide exerce sur la surface extérieure de la sonde. Dans un premier temps, un modèle élémentaire a été développé afin de simuler le comportement du volume de béton frais lors de la rotation de la toupie (Figure 0-3).



Figure 0-3: Modèle simplifié de la toupie de malaxage

Cependant, le logiciel se réfère à une base cartésienne immobile et ne se déplace pas en fonction de l'angle de rotation. Afin d'obtenir les forces de traînée que le fluide exerce sur la sonde, il est nécessaire de projeter les différents vecteurs proposés par le logiciel sur le repère orthonormé de la sonde. La force de traînée qu'exerce le fluide sur la surface extérieure de la sonde peut alors être calculée et correspond, en théorie, aux forces de pression que le capteur réel fournit. Les étapes de calcul sont détaillées sur la Figure 0-4.



Figure 0-4: Changement de repère spatial

Dans ce cas de figure, l'ensemble mécanique composé de la sonde et de la toupie de malaxage est mis en mouvement. Par conséquent, la position de la surface extérieure du capteur est donc variable en tout temps. Dans ce cas de figure, le protocole d'extraction de données proposé dans la section 3.5 n'est plus valide, car les points d'intérêts sont maintenant variables et dépendants de l'angle de rotation. Afin d'exploiter les résultats des calculs numériques, un processus itératif de calcul de la surface extérieure de la sonde est donc obligatoire et doit être ajouté dans le programme python afin d'obtenir les résultats espérés. Ce code n'a pas été réalisé pendant ce projet par manque de temps, mais cette hypothèse de poursuite de recherche semble très prometteuse. Finalement, la dernière étape serait la modélisation de la toupie de malaxage et du béton frais en son sein. Pour des soucis de temps et de dépense du calcul informatique, uniquement $\frac{1}{3}$ du volume de la toupie a été modélisé ainsi qu'un volume faible de béton frais (Figure 0-5).



Figure 0-5: Modélisation d'un écoulement circulaire de la toupie sur Flow-3D Hydro©

Comme évoqué précédemment, ce modèle permet d'obtenir la pression de traînée que le fluide exerce sur la sonde rhéologique lors de son passage dans le fluide. Cet ultime modèle est prometteur puisqu'il constitue un lien direct entre la prise de donnée industrielle/expérimentale et les simulations numériques. Cependant, même après différentes optimisations, le temps de calcul de cette simulation est extrêmement élevé (plus de 5 jours en continu pour uniquement un volume faible de béton) et est la plus grande limitation de ce problème. De manière utopique, l'application pas à pas des différents modèles élémentaires, des protocoles et codes informatiques proposés tout au long de cette maîtrise et finalement la mise en place

de cette dernière simulation est une étape et forme un ensemble très prometteur dans la transition digitale de la production de béton et surtout un tournant essentiel dans la numérisation et l'utilisation des technologies de pointe dans le domaine du béton frais. Pour conclure, cette maîtrise a permis de développer différents outils élémentaires de modélisation d'écoulement du béton frais. Ces différents modèles, utilisés simultanément, permettent donc de caractériser le béton, de valider les différents comportements de ce fluide par rapport à la partie expérimentale et finalement de comparer les résultats obtenus industriellement.

Recommandations

Comme souligné dans les chapitres précédents, les modélisations numériques proposées tout au long de ce projet de recherche se veulent simples et élémentaires. Les différents mécanismes et interactions complexes ne sont pas pris en compte dans les simulations proposées. Cependant, pour espérer obtenir une simulation numérique complexe réaliste, ces différentes hypothèses doivent être incorporées sur le logiciel. Premièrement, la théorie de l'écoulement en surface libre du béton frais doit être contestée, car dans tous les modèles, une interaction entre le fluide et une surface extérieure est observée. Dans le cas de figure du plan incliné, afin de recréer les forces de frottement entre la porte en mouvement et le fluide examiné, il pourrait être intéressant de modéliser la trappe d'ouverture avec un mouvement progressif. Du point de vue de l'essai au cône d'Abrams, Němeček (2021) a modélisé de nombreuses simulations numériques avec une interface visqueuse entre le cône d'Abrams et le béton frais. D'après ses expériences, il est crucial de prendre en compte ce paramètre dans la simulation, car la différence d'affaissement entre les exemples avec et sans cône est de l'ordre de 7%. En effet, tout au long de l'écoulement, la pâte de ciment ainsi que la matrice cimentaire semblent adhérer au moule en acier. Ce phénomène nécessite donc l'ajout d'un paramètre numérique simulant le frottement ou la viscosité existant entre les parties fluides du béton et la surface solide en mouvement. Finalement, la quantité d'eau et d'additif employée, variant d'un essai à l'autre, la détermination de la valeur du coefficient de friction du contact acier-béton n'est pas constante et nécessite une attention toute particulière.

D'un autre côté, les bétons frais testés tout au long de ce projet de recherche ont un affaissement situé entre 180 et 250 mm. Il est donc nécessaire de tester ces différents modèles pour des affaissements plus étendus afin d'établir un lien numérique fiable sur une plage d'affaissement plus large. Les modèles définis précédemment sont donc des outils idéaux pour une future campagne d'essais plus complète couvrant des bétons dont les affaissements se situent en dehors de cette plage choisie.

Pour finir, la dernière recommandation proposée dans cette section serait la mise en place d'une ou de plusieurs phases granulaires avec des tailles de particules diverses. En effet, puisque le béton est un matériau granulaire, la nécessité d'implémenter une phase liquide granulaire composée de particules de différentes tailles semble être la suite logique de ce modèle numérique. En effet, à l'image de la technique de maillage par éléments discrets (Figure 0-6), le modèle numérique peut intégrer au sein de son volume de fluide, différentes particules élémentaires de taille différente. Les différentes questions soulevées par ce type d'hypothèse sont nombreuses: quelles sont les différentes tailles des particules étudiées ? Quel est le coefficient de friction de l'interaction granulat-liquide ? De l'interaction granulatgranulat ? De l'interaction granulat-surface extérieure ?



Figure 0-6: Modélisation particulaire - (Hoornahad & Koenders, 2012)

Pour conclure ce projet, les différentes recommandations proposées sont résumées ci-dessous:

- Mise en place d'une interface complexe entre le béton frais et les surfaces extérieures en mouvement / mise en place d'une viscosité dynamique évoluant en fonction des surfaces extérieures en contact.
- Augmentation de la plage d'affaissement étudiée et ainsi étendre l'étude sur un plus grand nombre de bétons frais
- Afin de représenter encore plus fidèlement le béton, la mise en place d'une phase granulaire avec différentes tailles de particules peut être effectuée

Bibliographie

Amziane, S., Ferraris, C. F., & Koehler, E. (2006). *Feasibility of Using a Concrete Mixing Truck as a Rheometer*.

Anderson, J. D. (1991). Fundamentals of aerodynamics. McGraw-Hill.

- Balmforth, N. J., Craster, R. V., & Sassi, R. (2002). Shallow viscoplastic flow on an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 470, 1-29. https://doi.org/10.1017/S0022112002001660
- Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., de Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., & Wallevik, J. E. (2000). Comparison of concrete rheometers International tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000. In *NIST*.
- Baracu T. (2012). Computational analysis of the flow around a cylinder and of the drag force.
- Barreto, D., & Leak, J. (2020). A guide to modeling the geotechnical behavior of soils using the discrete element method. In *Modeling in Geotechnical Engineering* (p. 79-100). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821205-9.00016-2
- Baudez, J. C., Chabot, F., & Coussot, P. (2002). Rheological interpretation of the slump test. *Applied Rheology*, *12*(3), 133-141. https://doi.org/10.1515/arh-2002-0008
- Beaupre, D. (2012). *Mixer-mounted probe measures concrete workability*.
- Berger, X. (2023). *Proposition de recherche et préparation orale de doctorat (GCI-8084)*.
- Bergeron, P. (1953). Considérations sur les facteurs influençant l'usure due au transport hydraulique de matériaux solides. Application plus particulière aux machines. https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1953_act_2_1_3256
- Bingham, E. (1922). *Fluidity and Plasticity (Digitized by the Internet Archive in 2007)*. http://www.archive.org/details/fluidityplasticiOObinguoft
- Bruschi, G., Nishioka, T., Tsang, K., & Wang, R. (2003). A comparison of analytical methods drag coefficient of a cylinder.

- Caceres, E. C. (2019). Impact de la rhéologie des matériaux cimentaires sur l'aspect des parements et les procédés de mise en place. https://tel.archivesouvertes.fr/tel-01982159
- Chanson, H., Jarny, ; S, & Coussot, P. (2006). *Dam Break Wave of Thixotropic Fluid*. https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292006132:3280
- Chi, Z. P., Yang, H., Li, R., & Sun, Q. C. (2021). Measurements of unconfined fresh concrete flow on a slope using spatial filtering velocimetry. *Powder Technology*, 393, 349-356. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.088
- Cochard, S., & Ancey, C. (2009). Experimental investigation of the spreading of viscoplastic fluids on inclined planes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 158(1-3), 73-84. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.08.007
- Coussot, Philippe., & Ancey, C. (Christophe). (1999). *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. EDP Sciences.
- CSA Group. (2019). CSA A23.1:19 / CSA A23.2:19: Concrete materials and methods of concret construction / Test methods and standard practices for concrete.
- Daczko, J. A. (2000). A proposal for measuring rheology of production concrete.
- De Larrard, F. (1999). *Structures granulaires et formulation des bétons*. http://www.lcpc.fr/betonlabpro
- De Larrard, F., Ferraris, C. F., & Sedran, T. (1998). *Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material* (Vol. 31).
- Domone P.L.J., J. J. (1999). Properties of mortar for self-compacting concrete. *RILEM*, 109-120.
- El-Reedy, M. (2009). Advanced Materials and Techniques for Reinforced Concrete Structures.
- Emborg M. (1999). *Rheology tests for self-compacting concrete how useful are they for the design of concrete mix for full-scale production.*
- Fall A. (2008). *Rhéophysique des fluides complexes : Ecoulement et Blocage de suspensions concentrées*. https://www.researchgate.net/publication/30515545
- Ferraris, C. F., Brower, L. E., Beaupré, D., Chapdelaine, F., Domone, P., Koehler,E., Shen, L., Sonebi, M., Struble, L., Tepke, D., Wallevik, O., & Wallevik, J. E.

(2003). Comparison of concrete rheometers: International tests at MB. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7154

- Ferraris, C. F., & de Larrard, F. (1998a). Rhéologie du béton frais remanié III L'essai au cône d'Abrams modifié.
- Ferraris, C. F., & de Larrard, F. (1998b, février). NISTIR 6094 Testing and modelling of fresh concrete rheology. NISTIR 6094. https://ciks.cbt.nist.gov/~garbocz/rheologyNISTIR/FR97html.htm
- Fischedick, M., Roy, J., Abdel-Aziz, A., Acquaye Ghana, A., Allwood, J., Baiocchi,
 G., Clift, R., Nenov, V., Yetano Roche Spain, M., Roy, J., Abdel-Aziz, A.,
 Acquaye, A., Allwood, J. M., Ceron, J., Geng, Y., Kheshgi, H., Lanza, A.,
 Perczyk, D., Price, L., ... Minx, J. (2014). *Climate Change 2014*.

Fox R., & McDonald A. (2004). Introduction to fluid mechanics.

Franco Correa I.-D. (2019). Étude tribologique à hautes températures de matériaux céramiques structurés à différentes échelles.

GIEC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. www.ipcc.ch

- Gouvernement du Canada. (2021, mai 31). Déclaration commune: L'industrie canadienne du ciment et le gouvernement du Canada annoncent un partenariat. https://www.ic.gc.ca/eic/site/icgc.nsf/fra/07730.html
- Grenier, M. (1998). *Microstructure et résistance à l'usure de revêtements crées par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane*.
- Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1926). Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, 39(4), 291-300. https://doi.org/10.1007/BF01432034
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5
- Hoornahad, H., & Koenders, E. A. B. (2012). Simulation of the slump test based on the discrete element method (DEM). Advanced Materials Research, 446-449, 3766-3773. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.3766

- Hu, C., de Larrard, F., Sedran, T., Boulay, C., Bosd, F., & Deflorenne, F. (1996).
 Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. In Materials and Structures/Mat~riaux et Constructions (Vol. 29).
- Jeong, S. W., Locat, J., Leroueil, S., & Malet, J. P. (2007). Rheological properties of fine-grained sediments in modeling submarine mass movements: The role of texture. Submarine Mass Movements and Their Consequences, 3rd International Symposium, 191-198. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6512-5 20
- Kabagire, K. D. (2018). *Modélisation expérimentale et analytique des propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants.*
- Katopodes, N. D. (2019). Volume of Fluid Method. In *Free-Surface Flow* (p. 766-802). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815485-4.00018-8

Khayat. (2008). Personnal Communication.

Kosmatka, S. (2011). Dosage et contrôle des mélanges de béton (8ème édition).

Li, H., Wu, A., & Cheng, H. (2022). Generalized models of slump and spread in combination for higher precision in yield stress determination. *Cement and Concrete Research*, 159. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106863

Massey, B., & Smith, J. (2012). *Mechanics of fluids 9ème édition*.

- Mokéddem, S. (2014). 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. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00993153
- Munson, B. R., & Young, D. R. (2006). Fundamental of Fluid Mechanics (5th éd.).

Munson, M., Young, M., & Okiishi, M. (2020). *Mécanique des fluides* (8ème édition).

- Murata, J., & Kikukawa, H. (1992). Viscosity Equation for Fresh Concrete.
- Nakayama, Y., & Boucher, R. F. (2000). *Introduction to fluid mechanics*. Butterworth-Heinemann.
- Němeček, J. (2021). Numerical simulation of slump flow test of cement paste composites. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 30, 58-62. https://doi.org/10.14311/APP.2021.30.0058
- Nikitin, K. D., Olshanskii, M. A., Terekhov, K. M., & Vassilevski, Y. V. (2011). A numerical method for the simulation of free surface flows of viscoplastic fluid in

3D. Journal of Computational Mathematics, 29(6), 605-622. https://doi.org/10.4208/jcm.1109-m11si01

Noh, W. F., & Woodward, P. (1976). SLIC (Simple Line Interface Calculation).

- Odabas, D. (2018). Effects of Load and Speed on Wear Rate of Abrasive Wear for 2014 Al Alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 295(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/295/1/012008
- Pintaude, G. (s. d.). *Characteristics of Abrasive Particles and Their Implications on Wear*. www.intechopen.com
- Poullain, P. (2003). Étude comparative de l'écoulement d'un fluide viscoplastique dans une maquette de malaxeur pour béton.
- R. J. Cattolica. (2003). Experiment F2: Water Tunnel. In *MAE171A/175A Mechanical* Engineering Laboratory Manual (Winter Quarter).
- Raper, R. M. (1966). Drag force and pressure distribution on cylindrical protuberances immersed in a turbulent channel flow.
- RMCAO. (2013). CSA A23.2-5C: Concrete Basics Slump Test.
- Roques, A., & School, H. (2006). *High resolution seismic imaging applied to the geometrical characterization of very high voltage electric pylons*. https://www.researchgate.net/publication/281566156
- Roussel, N. (2006). Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 39(4), 501-509. https://doi.org/10.1617/s11527-005-9035-2
- Roussel, N., & Coussot, P. (2005). "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *Journal of Rheology*, 49(3), 705-718. https://doi.org/10.1122/1.1879041
- Roussel, N., Geiker, M. R., Dufour, F., Thrane, L. N., & Szabo, P. (2007).
 Computational modeling of concrete flow: General overview. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1298-1307.
 https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.007
- Schaer, N. (2019). *Modélisation des écoulements à surface libre de fluides nonnewtoniens*. https://theses.hal.science/tel-02166968

- Schowalter, W. R., & Christensen, G. (1998). Toward a rationalization of the slump test for fresh concrete: Comparisons of calculations and experiments. *Journal* of Rheology, 42(4), 865-870. https://doi.org/10.1122/1.550905
- Sofiane Amziane, Chiara F. Ferraris, & Eric P. Koehler. (2005). Measurement of Workability of Fresh Concrete Using a Mixing Truck. *Journal of Research of the National Institute of Standards Technology*, 55-56.
- Sooraj, P., Agrawal, A., & Sharma, A. (2018). Measurement of Drag Coefficient for an Elliptical Cylinder. *Journal of Energy and Environmental Sustainability*, 5, 1-7. https://doi.org/10.47469/jees.2018.v05.100050

Stachowiak G. (2006). Wear - Materials, Mechanisms and Pratice.

Stachowiak G.W. (1993). Tribology Series (Vol. 24, p. 557-612). Elsevier.

Tattersall, G., & Banfill, P. F. G. (1983). *The rheology of fresh concrete*.

The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use « The European Guidelines for Self Compacting Concrete ». (2005). www.efnarc.org

University College London. (2010). Pressure around a cylinder and cylinder drag.

- Van Oudheusden, B. W., Scarano, F., Roosenboom, E. W. M., Casimiri, E. W. F., & Souverein, L. J. (2007). Evaluation of integral forces and pressure fields from planar velocimetry data for incompressible and compressible flows. *Experiments in Fluids*, *43*(2-3), 153-162. https://doi.org/10.1007/s00348-007-0261-y
- Vasilic, K., Gram, A., & Wallevik, J. E. (2019). Numerical simulation of fresh concrete flow: Insight and challenges. *RILEM Technical Letters*, 4, 57-66. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.92
- Viccione, G., Ferlisi, S., & Marra, E. (2010). A numerical investigation of the interaction between debris flows and defense barriers. http://www.unisa.it/docenti/giacomoviccione/en/index

Wallevik J. (2006). Relation between the Bingham parameters and slump.

Wallevik, J. E. (2006). Relationship between the Bingham parameters and slump.
 Cement and Concrete Research, 36(7), 1214-1221.
 https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.001

Wallevik, J. E., & Wallevik, O. H. (2020). Concrete mixing truck as a rheometer.CementandConcreteResearch,127.https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105930

Annexe A : Protocole expérimental de l'essai d'affaissement

<u>Spécification technique</u>: Le cône d'Abrams, représenté à la Figure, est en acier avec un diamètre intérieur à sa base de 20 cm, un diamètre intérieur à son sommet de 10 cm et une hauteur totale de 30 cm. La tige utilisée pendant l'essai est en acier, de 1.6 cm de diamètre et de 60 cm de long avec une extrémité arrondie.

Protocole d'essai:

- 1. Après avoir humidifié le cône d'affaissement, on le place sur une surface humide, lisse, non absorbante, plane et suffisamment stable.
- L'opérateur se tient debout sur 'les pattes' du cône tout au long du test et remplit en 3 fois le cône (au 1/3, au 2/3 puis au 3/3 du volume). Chaque couche est 'piquée' par la tige 25 fois.
- L'opérateur arrase le cône (enlève l'excédent au-dessus) avec la tige pour que le cône soit exactement plein puis il enlève tout le béton renversé autour de la base.
- 4. Le cône doit être soulevé verticalement avec un mouvement lent et régulier, en prenant environ 5 secondes.
- 5. Finalement, la tige est posée horizontalement sur le dessus du cône d'affaissement et l'opérateur mesure la distance d'affaissement entre le bas de la tige et le sommet moyen du béton affaissé. La mesure doit être effectuée dans les 10 minutes qui suivent l'étape 4.



Figure annexe 1: Essai d'affaissement au cône d'Abrams | <u>https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/classes-de-</u> consistance-du-beton/

Annexe B : Relations théoriques entre l'affaissement et le seuil de cisaillement

Roussel et Coussot (Roussel & Coussot, 2005) ont repris l'analyse du modèle de Christensen tout en divisant l'écoulement en deux régimes d'écoulement asymptotique définie par le rapport entre le rayon final R (m) et la hauteur finale (H-S) du cône d'affaissement,

Lorsque $R \ll (H - S)$, les variations de contrainte sont majoritairement dans la direction verticale, l'expression du seuil de cisaillement se calcule comme suivant:

$$\tau_0 = \frac{\rho \cdot g(H-S)}{\sqrt{3}} \tag{A.1}$$

Lorsque R >> (H - S), la contrainte tangentielle est la plus importante et la relation suivante est obtenue:

$$\tau_0 = \frac{225.\,\rho.\,g.\,V^2}{128.\,\pi^2.\,R^5} \tag{A.2}$$

De plus, la formule énoncée par Murata et Kikukawa (Murata & Kikukawa, 1992) permets de relier les deux paramètres pour des valeurs d'affaissement comprises entre 125 et 260 mm et une taille maximale de granulats grossiers de 20 mm:

$$\tau_0 = A * \log(S_L) + B$$
(A.3)
avec $S_L = \frac{Slump \ [mm]}{100}$, $A = -483 \ et \ B = 729$

Cette dernière a été déterminée à l'aide d'un rhéomètre à cylindres concentriques. D'après la littérature scientifique, l'équation reliant le seuil de cisaillement et l'affaissement doit inclure la valeur de la densité du béton: ρ puisque cette dernière est gouvernée par le rapport $\tau_0/g_{.\rho}$. Par la suite, Hu et al. (Hu et al., 1996) ont établi une relation basée sur diverses simulations numériques de plusieurs mélanges tout en gardant l'hypothèse d'une viscosité ne dépassant jamais 300 *Pa.s.*

$$\tau_0 = \frac{\rho}{270} (300 - S) \tag{1.8}$$

avec S le slump en mm, ρ la masse volumique en kg/m³ et τ_0 en Pa

Pour des mélanges plus fluides, de Larrard et Ferraris (Ferraris & de Larrard, 1998b) proposent la relation suivante:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347} (300 - S) + 212 \tag{1.9}$$

Enfin, Wallevik (Wallevik J., 2006) a utilisé cette précédente relation avec le rhéomètre Contec afin d'en déduire l'équation suivante:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{416} (300 - S) + 394 \tag{1.10}$$

D'autres modèles existent et sont recensés dans le tableau ci-contre.

- Le modèle de Tanigawa (1992) se base sur la mécanique appliquée: le béton est supposé incompressible, sa forme reste sous forme de cône après l'essai.
- Le modèle de Chidiac (2000) est l'amélioration du premier modèle.

Tableau B-1: Modèles de	prédiction du	u taux de	cisaillement τ_	0 (Pa)(Kabagire,	2018)

Modèle	Relation	Paramètres
Tanigawa	$\tau_0 = \frac{\alpha.\rho.g.(H-A)}{\sqrt{3}}$ $\alpha = \frac{1+a+a^2}{3}$	ρ la masse volumique ($\frac{kg}{m^3}$), A l'affaissement du cône (m), D l'étalementdu béton (m), g l'accéleration ($\frac{m}{r^2}$),
Chidiac	$\tau_0 = \frac{4. g. v.}{\sqrt{3} \pi} \left(\frac{\rho}{D^2}\right)$	v le volume du cône (m ³), H la hauteur du cône (m), a le rayon au sommet sur le rayon de la base du cône,

Annexe C : Fiche technique Eucon 37



2835, boul. Grande Allée • Saint-Hubert (Québec) J4T 2R4 1-800-667-0920 tél. • 450-465-2140 téléc.

www.euclidchemical.com

EMBALLAGE

EUCON 37 est offert en vrac, en contenants de 1000 litres, en barils de 205 litres et en seaux de 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Deux ans dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

- · Entièrement conforme aux exigences de la norme ASTM C 494, adjuvants de type A et F.
- · Entièrement conforme aux exigences de la norme AASHTO M 194.
- · EUCON 37 est approuvé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) et celui de l'Ontario (MTO).

MODE D'EMPLOI

EUCON 37 peut être ajouté à l'eau de gâchage initiale ou directement sur le béton fraîchement dosé, puis mélangé pendant approximativement 5 minutes ou 70 tours. Toutefois, les meilleurs résultats ont été observés lorsqu'il est ajouté directement sur le béton fraîchement dosé. Le produit ne doit pas entrer en contact avec du liant sec ou d'autres adjuvants avant que ces derniers ne soient bien mélangés à la gâchée de béton.

EUCON 37 est typiquement utilisé à des dosages de 400 à 1170 ml par 100 kg de liant. D'autres dosages sont acceptables si des essais préalables sont réalisés et que des confirmations sont obtenues quant à la performance désirée avec les matériaux précis qui seront utilisés.

Pour toutes les applications de béton, y compris le béton autoplaçant (BAP), le dosage d'EUCON 37 variera en fonction de la formulation, des matériaux locaux et des besoins particuliers du producteur de béton. Des formulations d'essai devraient être effectuées afin de vérifier la performance à l'état plastique et durci avec des matériaux locaux. Si la granulométrie des matériaux n'est pas optimale pour un BAP, un modificateur de viscosité pourrait être utilisé pour améliorer la qualité du mélange. Veuillez contacter votre représentant Euclid afin d'obtenir des recommandations relatives aux formulations d'essai et aux dosages.

EUCON 37 est compatible avec la plupart des adjuvants, y compris les agents entraîneurs d'air, les accélérateurs, la plupart des réducteurs d'eau, les retardateurs, les réducteurs de retrait, les inhibiteurs de corrosion, les modificateurs de viscosité et la silice micronisée; toutefois, chaque matériau devrait être ajouté au béton séparément.

Figure 1. Dosage recommandé d'Eucon 37 pour l'obtention d'un béton fluide (180 à 230 mm [7 à 9 po] d'affaissement)

Affaissement initial, mm (po)	Plage de dosage d'Eucon 37, ml/100 kg	
100 (4)	520 à 650	
75 (3)	650 à 780	
65 (2 1/2)	780 à 910	
50 (2)	910 à 1040	
40 (1 1/2)	1040 à 1170	

Mise en place

Le béton traité avec EUCON 37 doit être mis en place selon la même technique utilisée pour le béton classique. Coffrages

Les coffrages pour murs ou sections étroites doivent être étanches, résistants et avoir de bons dispositifs de contreventement. Pendant la « période de fluidité », lorsque le béton a un affaissement de 180 à 230 mm (7 à 9 po), celui-ci exercera une pression plus élevée que le béton classique à la base du coffrage. Le coffrage pour dalles est le même que pour le béton classique.

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- EUCON 37 doit être protégé du gel; toutefois, le gel et le dégel subséquent n'endommagent pas le matériau si ce dernier a été mélangé vigoureusement. Ne pas agiter avec de l'air ou avec une lance à air.
- · Le béton doit être protégé du gel jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance minimale de 7 MPa.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

Révision : 2.15

GARANTE: Excide Canada, (Excide), generative uniquement et expressiment que sea produits sont sans déleuss de matériel ou de main d'œuvre pendant six mois à partir de l'achait. A moins d'ètre autoritée par Éurit par nesponsable d'Euclid, aucume représentation ou deletaration verbale ou éonte par Euclid et ses représentations pendant six mois à partir de l'achait. A moins d'ètre autoritée par Éurit par nesponsable d'Euclid, aucume représentation ou deletaration verbale ou éonte par Euclid et ses représentations peud modifier cette generale. PRAISON DE LA GRANDE EUR CARANTE ENPLICITE OU DIVENTE OLIVITE LOYALE ET MARCHANDE OU L'APTITUDE À REMINER UNE UTILISATION ORIGINARE OU PARTICULIERE DE SES PRODUITS ET LES DICLUT DE SA DARANTE ENPLICITE OU DIVENTE OUNNT À LA GUALITE LOYALE ET MARCHANDE OU L'APTITUDE À REMINER UNE UTILISATION ORIGINARE OU PARTICULIERE DE SES PRODUITS ET LES DICLUT DE SA DARANTE ENPLICITE OU DIVENCITE OU DIVENCITE OU DIVENCITE COUNTS ET LES DICLUT DE SA DARANTE MAL E FAIT MÊME. Si un produit Euclid ne rencontre pas la genarité, Euclid emplacema la produit, sans fixia pour Tachieur La remplacement du produit sent les solution remonse, en son nom, à taire des énonies verbaux ou échit qui modifient les renseignements et les instructions d'instalation qui se touvert sur les fiches techniques ou sur l'embleque. Tout produit Euclid qui n'est pas instalà selon les renseignements et les instructures d'instalation qui ser sa sagnates. L'acheteur sens l'este numer l'este autorite par sense genantée ou une veriante à la genarité. L'acheteur sens l'unique responsable pour délemminer la partinence des produits. Euclid en lonction de saire.

Annexe D : Fiche technique MasterSet® Delvo

	03 30 00	Béton coulé sur place
~	03 40 00	Béton préfabriqué
3	03 70 00	Béton de masse



MasterSet[®] DELVO

Adjuvant pour contrôler l'hydratation

Description

Le MasterSet DELVO est un adjuvant liquide, prêt à utiliser, conçu pour créer un béton plus uniforme à haute performance et prévisible. L'adjuvant MasterSet DELVO retarde le temps de prise en contrôlant l'hydratation du ciment Portland et des autres matériaux cimentaires, tout en facilitant les opérations de mise en place et de finition. L'adjuvant MasterSet DELVO respecte la norme ASTM C 494/C 494M pour les adjuvants retardateurs de type B et les adjuvants réducteurs d'eau/ retardateur de type D.

Utilisations

Recommandé pour :

- La stabilisation de l'eau de lavage du béton
- La stabilisation du béton plastique retourné
- La stabilisation du béton fraîchement mélangé pour les longues périodes de transport
- Le béton 4x4^{MC}
- Le béton pompé, le béton projeté (procédé humide) et le béton coulé conventionnellement
- Le béton non armé, armé, préfabriqué, léger et de poids normal

Le béton autodrainant

Caractéristiques

- Réduit le contenu en eau nécessaire à une ouvrabilité donnée
- Retarde les caractéristiques du temps de prise
- Amélioration de l'ouvrabilité

Avantages

- Permet la flexibilité des opérations de mises en place et de finition
- Décale les effets de la perte d'affaissement lors de délais entre le malaxage et la mise en place
- Réduit les déchets associés au lavage du béton et au béton retourné
- Augmente la résistance à la compression et à la flexion

Caractéristiques de rendement

Taux de durcissement : La température du mélange de béton et la température ambiante (coffrages, sol, air, etc.) influencent le taux de durcissement du béton. À température élevée, le béton durcira plus rapidement, ce qui pourrait causer des problèmes de mise en place et de finition.

L'une des fonctions de l'adjuvant MasterSet DELVO est de retarder la prise du béton. Utilisé dans les marges de dosage normales, il allongera la période d'emploi et de prise du béton contenant du ciment Portland, des cendres volantes, des laitiers et des fumées de silice d'approximativement 1 à 5 heures, comparativement à un mélange de béton ordinaire, selon les éléments et la température du chantier. Des mélanges d'essai devront être préparés selon les conditions approximatives du chantier afin de déterminer les dosages requis.

Résistance à la compression : Le béton préparé avec l'adjuvant MasterSet DELVO développera une résistance initiale (24 heures) et ultime plus grande que le béton ordinaire, lorsqu'utilisé dans les dosages recommandés et sous des conditions normales et comparables de mûrissement. Lorsque l'adjuvant MasterSet DELVO est utilisé dans un béton à mûrissement chaud, la période de réchauffement devra être prolongée jusqu'à ce que la prise initiale soit atteinte. La période effective de mûrissement à chaud sera alors réduite afin de maintenir le cycle de production existant sans sacrifier la résistance initiale ou ultime.

> MBCC GROUP page 1 de 3

Principes d'utilisation

Dosage : Il est recommandé d'utiliser l'adjuvant MasterSet DELVO à un dosage de 260 ± 65 ml/100 kg (4 ± 1 oz liq/100 lb) de ciment pour la plupart des mélanges de béton utilisant les ingrédients standards. En cas de long délai avant le déchargement, comme lors de longues périodes de transport, un dosage supérieur pourrait être nécessaire. Plus spécifiquement, pour les utilisations sous forme de béton projeté, il est recommandé d'utiliser l'adjuvant MasterSet DELVO à un dosage de 100 ml/100 kg à 1 500 ml/100 kg (1,5 oz liq/100 lb à 25 oz liq/100 lb) de matériau cimentaire. À cause des variations et des conditions du chantier et des matériaux de béton, les dosages peuvent différer de ceux recommandés. Dans ce cas, communiquez avec votre représentant de Master Builders Solutions. Pour la stabilisation du lavage du béton et du béton retourné, reportez-vous aux tableaux MasterSet DELVO pour déterminer les dosages appropriés.

Données sur le produit

Corrosion – sans chlorure, non corrosif : L'adjuvant MasterSet DELVO ne provoquera ni ne favorisera la corrosion des armatures d'acier encastrées dans le béton. Aucun chlorure de calcium ou autre produit à base de chlorure n'est utilisé dans la fabrication de cet adjuvant.

Compatibilité : L'adjuvant MasterSet DELVO peut être utilisé avec n'importe lequel adjuvant Master Builders Solutions. En cas d'utilisation en combinaison avec un autre adjuvant, chaque produit doit être incorporé séparément au mélange.

Entreposage et manutention

Température d'entreposage : L'adjuvant MasterSet DELVO devrait être entreposé au-dessus du point de congélation. Si l'adjuvant MasterSet DELVO venait à geler, laissez décongeler à 2 °C (35 °F) et reconstituez complètement par une légère agitation mécanique. N'utilisez pas de dispositif à air comprimé pour l'agitation.

Durée de conservation : L'adjuvant MasterSet DELVO se conservera pour un minimum de 12 mois. Selon les conditions d'entreposage, il est possible que sa durée de vie soit supérieure à celle mentionnée. Si l'adjuvant MasterSet DELVO a dépassé sa durée de conservation, communiquez avec votre représentant de Master Builders Solutions pour savoir s'il convient d'utiliser le produit et quels sont les dosages recommandés.

Emballage

L'adjuvant MasterSet DELVO est offert en barils spécialement conçus de 208 L (55 gal), en bacs de 1 041 L (275 gal) et en vrac.

Documents connexes

Fiches signalétiques : adjuvant MasterSet DELVO

www.master-builders-solutions.com/en-us

page 2 de 3

Renseignements supplémentaires

Pour plus d'informations sur l'adjuvant MasterSet DELVO, consultez de votre représentant de Master Builders Solutions.

Master Builders Solutions, une marque du groupe MBCC, est le leader mondial en termes d'innovation dans le domaine des systèmes chimiques et des formules pour la construction, la maintenance, la réparation et la rénovation des structures. La division Adjuvants offre des produits avancés, des solutions et une expertise qui améliorent la durabilité, l'étanchéité, l'efficacité énergétique, la sécurité, la durabilité et l'esthétique des structures en béton, souterraines ou pas, pour aider ses clients à réduire les coûts d'exploitation et à améliorer l'efficacité et la qualité du produit fini.

La communauté d'experts Master Builders Solutions met à profit les ressources disponibles à l'échelle mondiale. Leur passion est de relever les défis qui apparaissent à toutes les étapes de la construction et de garantir la durée de vie des structures. Chez Master Builders Solutions nous mettons sur pied des solutions durables pour le secteur de la construction partout dans le monde.

Avis de garantie limitée

Master Builders Solutions Admixtures US, LLC ("Master Builders Solutions") garantit que ce produit est exempt de tout défaut de fabrication et respecte les propriétés techniques du présent Guide de données techniques, s'il est utilisé comme indiqué pendant sa durée de vie. L'obtention de résultats satisfaisants dépend non seulement de la qualité des produits, mais aussi de nombreuses circonstances indépendantes de notre volonté, MASTER BUILDERS SOLUTIONS N'OFFRE AUCUNE GARANTIE, EXPRESSE OU IMPLICITE, SUR SES PRODUITS, NOTAMMENT DES GARANTIES MARCHANDES OU DE CONVENANCE À UN USAGE PARTICULIER. Le seul et unique recours de l'acheteur pour toute réclamation concernant ce produit, y compris, mais sans s'y limiter, les réclamations faisant état d'une violation de garantie, de négligence, de responsabilité stricte ou autre, est l'expédition à l'acheteur d'une quantité de produit égale à celle qui n'est pas conforme à la garantie ou le remboursement du prix d'achat de ce produit, à la seule discrétion de Master Builders Solutions. Toute réclamation concernant ce produit doit être reçue par écrit dans un délai d'un (1) an à compter de la date d'expédition. L'acheteur renonce aux réclamations déposées après ce délai. MASTER BUILDERS SOLUTIONS NE PEUT ÊTRE TENUE RESPONSABLE DE TOUT DOMMAGE ACCESSOIRE, CONSÉCUTIF PARTICULIER. (Y COMPRIS LA PERTE DE PROFITS) OU PUNITIF DE QUELQUE NATURE QUE CE SOIT.

L'acheteur doit déterminer l'adéquation des produits à l'utilisation prévue et assume tous les risques et responsabilités à cet égard. Ces renseignements, et tout autre conseil technique formulé ultérieurement, reposent sur l'expérience et les connaissances actuelles de Master Builders Solutions. Cependant, Master Builders Solutions n'assume aucune responsabilité quant à la communication de tels renseignements ou conseils, y compris dans la mesure où ces renseignements ou conseils peuvent être liés aux droits de propriété intellectuelle de tiers, en particulier les droits de brevet. De plus, aucune relation juridique ne peut être créée ou entraînée par la présentation de ces renseignements ou conseils techniques. Master Builders Solutions se réserve le droit d'apporter des changements selon les progrès technologiques et les développements ultérieurs. L'acheteur du ou des produits doit les tester pour déterminer leur adéquation à l'application et l'utilisation prévues avant de procéder à leur application complète. Seuls des experts qualifiés peuvent vérifier le rendement du produit décrit ici en procédant à des essais.



© MBCC Group = 04/21 = DAT-0021F ® registered trademark of a MBCC Group m

Naster Builders Solutions Admixtures US, LLC 23700 Chagrin Boulevard Cleveland, Ohio 44122-5544 USA III 800-628-9990 Master Builders Solutions Canada, Inc. 1800 Clark Boulevard Brampton, Ontario L6T 4M7 CANADA # 289-360-1300

nber in many countries of the wo

www.master-builders-solutions.com/en-us

page 3 de 3

Annexe E : Exemple de code en langage python permettant la récupération et le traitement des données

```
path = Name+'.xlsx'
wb obj = openpyxl.load workbook(path)
sheet obj = wb obj.active
Coord x=[]
Pressions=[]
Press Ref=0
            Pressions.append(p.value)
            Coord x.append(x.value)
            Coord y.append(y.value)
            Coord y.append(y.value)
            Pressions.append(p.value)
            Coord x.append(x.value)
            Coord x.append(x.value)
            Coord y.append(y.value)
            Pressions.append(p.value)
```

```
Coord x.append(x.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord_y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
```

```
Coord_x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord_x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord x.append(x.value)
Pressions.append(p.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord_x.append(x.value)
Coord_y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
```
```
Pressions.append(p.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord_x.append(x.value)
Coord_y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Pressions.append(p.value)
Coord x.append(x.value)
Coord x.append(x.value)
Pressions.append(p.value)
Coord_x.append(x.value)
Coord y.append(y.value)
Press Ref=Press Ref+p.value
```

```
Ref Pression=(Press Ref)/4
print(Coord x)
print(Pressions)
print(Press Ref)
11 = Coord x
13 = Pressions
14=Ref Pression
df = DataFrame({'x':l1,'y':l2,'p':l3,'Ref':l4})
df.to excel(Name+'pointsreduit.xlsx', sheet name='sheet1', index=False)
fig=go.Figure(data=[go.Scatter3d(x=df['x'],
fig.show()
gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR RGB2GRAY)
  binary = cv2.threshold(gray, 225, 255, cv2.THRESH BINARY INV)
```

```
# show it
plt.imshow(binary, cmap="gray")
plt.show()
# find the contours from the thresholded image
contours, hierarchy = cv2.findContours(binary, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
# draw all contours
image = cv2.drawContours(image, contours, -1, (0, 255, 0), 2)
# show the image with the drawn contours
plt.imshow(image)
plt.show()
```