

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

VALORISATION DE LA BOUE PRIMAIRE COMME ADDITIF DANS LE MORTIER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN SCIENCES ET GÉNIE DES MATÉRIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

PAR

ALICIA MARIANNE BEDNARSKI

DÉCEMBRE 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN SCIENCES ET GÉNIE DES MATÉRIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

Direction de recherche :

Daniel Montplaisir

Prénom et nom

directeur de recherche

Jury d'évaluation

Simon Barnabé

Prénom et nom

Évaluateur interne

Houssein Awada

Prénom et nom

Évaluateur externe

Mohamed Habibi

Prénom et nom

Évaluteur interne

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire cherche à étudier une façon de valoriser la boue primaire de l'industrie papetière, notamment en l'utilisant dans un mélange de mortier. La boue primaire étant un rejet de l'industrie papetière, il est convenable d'y trouver une application secondaire. Ce projet vise à intégrer ce résidu dans le mortier à base de ciment, en s'appuyant sur des travaux similaires. Ces recherches suggèrent une théorie selon laquelle l'hydratation latente du ciment causée par la rétention de l'eau dans la fibre de la boue permet en fait d'en augmenter les propriétés physiques. Ainsi, le présent travail cherche à caractériser la boue utilisée, et explorer les réponses à la théorie proposée.

« On m'a appris que la voie du progrès n'était ni rapide ni facile. »

Marie Skłodowska Curie

DÉDICACE

*À mon Hamoureux,
qui a fait preuve de grande patience et de support bienveillant durant mon baccalauréat
et
qui a été source de motivation durant cette maîtrise,
et sans qui je n'aurais jamais eu la stabilité de me lancer dans de tels projets.*

*To Elsa,
my heart and soul,
I know that the limited time we have will never be enough to express my love for you.*

*To Cassiopeia,
who travels by my side, Closer to the Stars,
your presence anchors my feet to the Earth.*

*Babciu, dla to, co mi dałaś,
Wiedz, że pamiętam, I nigdy nie zapomnę
Że miałam kogoś co o mnie tak myślała,
I kochała.
Skończyłam to dla ciebie.*

*À vous tous qui êtes venus avant,
et qui viendrez après,
dont le passage marquera mon cœur et ma tête.*

Je vous dédie ce travail.

Alicia Marianne Bednarski

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, dans un premier lieu, l'entière Cascade de m'avoir permis d'entreprendre ce projet de façon adaptée à la réalité du travail combiné aux études. Grâce à une vision de valorisation de ses employés et d'évolution de leur compétence, je me dois de me sentir choyée d'être encouragée à m'améliorer dans le cadre de ma carrière. Rares sont les environnements dans lesquels j'ai vécu qui m'ont si facilement ouvert des portes et donné des ailes.

Dans un second lieu, j'aimerais remercier Anne-Marie, qui m'a si gentiment proposé de suivre le parcours d'une maîtrise. En réalité, ceci, ainsi que d'autres telles propositions qui m'ont permis de grandir, te reviennent.

Dans les jours plus difficiles, quand je doutais de moi et de ma capacité à finaliser mon projet, il y a eu Frédéric, qui a su m'accompagner avec bonne humeur, positivité et encouragement. Écouter ton vécu et l'assurance avec laquelle tu me disais que j'allais terminer ce que j'entreprenais m'a donné ce qu'il me manquait pour passer de D2 à D3 et finalement à D4. J'ai une dette envers le calme que tu dégages.

Simon, pouvoir rebondir mes idées sur toi m'a permis de garder le moral. Merci d'avoir pris le temps de m'écouter, et de me faire rire.

Finalement, à tous ceux et celles qui restent, si maints que vous êtes que je ne puis tous vous nommer, sachez que je vous remercie. Tous qui m'ont questionnée sur mes progrès, qui m'ont offert des conseils et des idées pour ne jamais cesser de m'améliorer, qui ont simplement pris le temps de m'écouter ou me faire rire, je vous dois les petits pas qui se sont transformés en kilomètres sur ce chemin. N'oubliez jamais le pouvoir qui réside dans le plus simple des gestes, qui n'est rien de plus ni de moins que demander à l'autre comment il va.

Résumé

Les déchets de l'industrie des pâtes et papiers consistent habituellement de boues (primaires, secondaires et de désencrage), et se composent de fibre rejetée, ainsi que de matière inorganique. Ces rejets présentent un potentiel de revalorisation dans d'autres industries, comme celle du ciment. Cette dernière génère une quantité importante de gaz à effet de serre lors de la production du ciment, la composante principale qui, à l'aide de réactions chimiques, se solidifie pour former un matériau de construction très commun. Pouvoir substituer une partie du ciment utilisé dans des applications bétonnières par de la boue primaire pourrait permettre de diminuer l'impact environnemental des deux industries. Pour cette raison, des ajouts de boue primaire à 5% de consistance ont été effectués dans un mélange de mortier, à des fractions de 0, 1/8, 1/4, 1/2, et 1/1. Il était question de caractériser physiquement et chimiquement la boue primaire produite par les usines Cascades de Kingsey Falls, d'évaluer l'effet de l'ajout de la boue dans des mélanges de mortier; de comparer les propriétés physiques d'un mortier avec un ajout de boue primaire avec un mortier sans ajout de boue, ainsi que de déterminer le pourcentage de boue pouvant être ajoutée au mortier ayant un impact négligeable sur les propriétés physiques de celui-ci. La caractérisation avait permis de déterminer une grande variabilité quant à la composition de la boue en raison de la variabilité de la matière première en production. Les propriétés physiques avaient été peu affectées pour les mélanges de 1/8 et 1/4, mais beaucoup pour ceux à 1/2 et 1/1. Pour donner suite à ce projet, une des avenues à explorer serait l'impact de la variation de la composition de la boue sur le mélange de mortier tout en fixant le taux optimal de boue dans le mélange. De plus, établir une façon d'utiliser une boue plus épaisse permettrait d'optimiser le transport et l'utilisation de celle-ci.

Mots clefs

Boue primaire, boue secondaire, boue de désencrage, résidus, valorisation, pâtes et papiers, industrie papetière, industrie cimentière, ciment, béton, mortier.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	6
Mots clefs	6
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux	10
Liste des équations	10
Liste des abréviations.....	11
Chapitre 1. Introduction	13
Chapitre 2 : Revue de littérature.....	17
2.1. L'industrie papetière.....	17
2.2. Les caractéristiques des fibres forestières	18
2.2.1. Les types de bois	18
2.2.2. Les composantes de la fibre.....	19
2.3. Les procédés de mise en pâte	23
2.3.1. Procédé de mise en pâte mécanique	23
2.3.2. Procédé de mise en pâte chimique	24
2.4. Les boues papetières.....	26
2.4.1. Définition et types de boues	26
2.4.2. Traitement des effluents et revalorisation de la boue	29
2.4.3. Réglementation.....	31
2.4.4. Caractérisation physico-chimique de la boue primaire.....	34
2.5. L'industrie du ciment.....	38
2.6. Le ciment, le béton et le mortier.....	39
2.6.1. Définitions et types de ciment.....	39
2.6.2. Réglementation.....	41
2.7 Les mécanismes de réaction du ciment.....	43
Chapitre 3. Matériel et méthodes.....	46
3.1. Matières premières	46
3.1.1. Les boues primaires.....	46
3.1.2. Le ciment	47
3.1.3. Le superplastifiant	47
3.1.4. Le sable	47
3.2 Méthodes.....	49
3.2.1. Méthodes d'analyse des boues.....	49

3.2.2	Méthodes d'analyse des cylindres de ciment	51
3.2.3	Fabrication des cubes de ciment.....	52
Chapitre 4. Résultats et discussion.		54
4.1.	Caractérisation de la boue	54
4.1.1	M.E.S., cendres et indice d'égouttage.....	54
4.1.2.	Analyse optique des fibres	55
4.1.3.	Spectroscopie infrarouge	56
4.1.4.	Analyse de microscopie par balayage électronique.....	57
4.2	Caractérisation des mélanges de mortier.....	59
4.2.1	Propriétés à l'état frais des mortiers	59
4.2.2	Résistance à la compression des mortiers	61
4.3.	Discussion sur les ajouts de boue dans le mortier	64
Chapitre 5. Conclusions		67
Références.....		70
Annexes		75
Annexe 1. Fiche technique du ciment utilisé dans le mélange de mortier.		76
Annexe 2. Fiche technique du superplastifiant utilisé dans le mélange de mortier.		77
Annexe 3. Fiche technique du sable utilisé dans le mélange de mortier.		79

Liste des figures

Figure 1. Forme moléculaire et unité de répétition du polymère de cellulose [18].	20
Figure 2. Forme moléculaire et unité de répétition de la lignine [19].	21
Figure 3. Schéma visualisant le procédé des pâtes et papiers [27].	26
Figure 4. Schéma illustrant le processus de clarification des eaux usées du procédé papetier [28].	28
Figure 5. Analyse par diffraction des rayons X de la boue primaire [41].	36
Figure 6. Diagramme de la formation du ciment à partir des matériaux bruts [44].	39
Figure 7. Évolution de la chaleur produite dans la réaction d'hydratation du ciment [44].	44
Figure 8. Spectre infrarouge de la boue primaire du traitement des eaux, prélevée le 27 janvier 2023.	56
Figure 9. Analyse élémentaire par MBE de la boue primaire TD2.	58
Figure 10. Étalement relatif du mortier en fonction de la fraction des fibres	59
Figure 11. Photographies des spécimens après étalement (approximativement à l'échelle).	60
Figure 12. Masse volumique relative du mortier en fonction de l'ajout de la fraction de fibres	61
Figure 13. Résistance à la compression du mortier, jour 1 et jour 28, en fonction de la fraction de fibres.	62

Liste des tableaux

Tableau 1. Composition chimique grossière du bois mou et du bois dur [17].	20
Tableau 2. Section du tableau 8.3 du guide de recyclage des matières résiduelles fertilisantes – 2015 [37].	33
Tableau 3. Composition physico-chimique de boue résultant du traitement des fibres de diverses sources [28].	35
Tableau 4. Composition chimique de la boue primaire de l'industrie du papier tissu [41].	36
Tableau 5. Composantes du ciment en pourcentage de poids [44].	43
Tableau 6. Norme granulométrique du sable Bomix utilisé dans les mélanges de mortier.	48
Tableau 7. Formulation des mortiers tels que préparés par l'UdeS	52
Tableau 8. Résultats des analyses physico-chimiques sur les diverses boues échantillonnées	54
Tableau 9. Résultats de l'analyse optique des boues par FiberTester.	55
Tableau 10. Résultats de l'analyse élémentaire par microscope à balayage électronique de l'échantillon TDE2.	57
Tableau 11. Propriétés à l'état frais des mortiers avec et sans ajout de fibres	59
Tableau 12. Résistances à la compression des mortiers au jour 1 et au jour 28	62

Liste des équations

$2Ca_3SiO_5 + 7H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O + 3Ca(OH)_2 + 173.6kJ$	Équation 1	43
$2Ca_2SiO_4 + 5H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O + Ca(OH)_2 + 58.6kJ$	Équation 2	43

Liste des abréviations

°C	Degré Celsius
ACIA	Agence canadienne d'inspection des aliments
ASTM	American Society for Tests and Materials
cm	Centimètre
DBO	Demande biologique en oxygène
GES	Gaz à effet de serre
kg	Kilogramme
m	Mètre
MBE	Microscope à balayage électronique
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
MES	Matières en suspension
min	Minute(s)
MJ	Méga Joules
mL	Milli Litres
mm	Millimètre
MPa/Pa	Méga Pascal/ Pascal
MRF	Matière résiduelle fertilisante
NBSK	Northern Bleached Softwood Kraft
PBDE	Polybromo diphényles éthers
RMP	Refiner Mechanical Pulp
SBSK	Southern Bleached Softwood Kraft

SGW	Stone Groundwood pulp
STS	Solides totaux suspendus
TDE	Traitement des eaux
TKF	Tissu Kingsey Falls
TMP	Thermo-Mechanical Pulp
UdeS	Université de Sherbrooke

Chapitre 1. Introduction

Dans le monde moderne, la demande globale pour l'industrie du ciment ne cesse de croître : il s'agit après tout d'un matériau dont les applications sont multiples, et dont la disponibilité est grande. La valeur estimée du marché mondial cimentier est de 340.61 milliards de dollars US en 2023, et les projections existantes parlent d'atteindre une valeur de 481.73 milliards d'ici l'an 2030. Plusieurs géants de cette industrie se voient en expansion continue dus à une demande grandissante pour les produits du ciment et du béton, et les pays où ces compagnies se trouvent sont multiples : la Suisse, la Chine, l'Italie, la Russie, le Canada et les États-Unis, notamment [1]. Le béton peut se vendre entre 152 et 315 \$/m³ [2] et il est estimé qu'aux États-Unis, en 2020, 87 millions de tonnes métriques de ciment ont été produites [3]. Il n'est pas surprenant de découvrir que l'industrie du ciment à elle seule contribue environ à 5% d'augmentation annuelle des gaz à effet de serre [4]. La Chine étant le plus grand producteur de ciment du monde, elle seule génère six fois plus de GES que son plus proche compétiteur, l'Inde, atteignant environ 853 millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone en 2021 [5]. Une bonne partie de la production des GES provient du processus de cuisson du calcaire dans la formation du ciment de Portland, soit le plus communément utilisé, et le reste des émissions proviennent surtout du transport de la matière première, ainsi que du transport du béton mélangé. Il s'agit donc d'une industrie pouvant bénéficier de la diminution de son empreinte écologique. En 2018, année où la production de gaz à effet de serre a atteint un maximum pour une étude, le plus grand contributeur aux GES directs était le secteur de l'énergie, incluant l'énergie thermique; ce domaine présente 34.2% des émissions GES mondiales. Les émissions liées aux industries sont secondes, avec 24.5% des émissions globales. À l'intérieur de cette catégorie, l'industrie du ciment est responsable de 2.7% des émissions totales alors que, comparativement, l'industrie de la métallurgie présente 7.9% des émissions. Il est à noter que la croissance annuelle depuis 2010 de l'émission des GES pour l'industrie du ciment représente 1.7% de la croissance totale [6].

La tendance est à l'opposer pour l'industrie des pâtes et papiers en ce qui se rattache à la contribution aux GES. La majorité des GES produits par celle-ci proviennent de la consommation énergétique associée à l'utilisation de combustibles fossiles : en 2015, en Europe, on compte 49 millions de tonnes métriques de GES produits, dont 65.3% correspondent à des émissions directes, et 24.5% à des émissions indirectes [7]. Comparativement aux 853 millions de tonnes métriques produites en 2021 en Chine par l'industrie du ciment, il devient évident que l'industrie du papier n'est pas une contributrice plus importante à cet enjeu. Initialement, avec l'arrivée de la messagerie numérique et du partage d'information par internet, le pronostic pour la viabilité du domaine papetier n'était pas favorable au début des années 2000. Cependant, l'apparition d'entreprises telles qu'Amazon, ainsi que la popularisation de la livraison à domicile, ont permis à l'industrie de croître dans le domaine de l'emballage carton-caisse. La production est passée de 193 501 tonnes métriques en 2008 à 256 138 tonnes métriques en 2018. Il est à noter qu'un déclin se fait ressentir dans le domaine du papier imprimé dû à la numérisation. La production a diminué de 151 489 tonnes métriques en 2008 à 115 571 tonnes métriques en 2018 [8]. De façon générale, l'industrie des pâtes et papiers ne verra pas sa disparition selon la tendance actuelle; il est donc encore profitable de rechercher des avenues de développement et d'optimisation. Une de ces avenues fait appel aux rejets de l'industrie, notamment à la boue produite lors du recyclage de la fibre dans le processus, dont la production annuelle au Canada est estimée à 1.4 million de tonnes [9]. Pour le moment, les boues ainsi produites sont envoyées à 29% dans des décharges, à 31% comme amendement de sol, à 35% comme source d'énergie thermique et à 5% dans d'autres applications. En 2012, le gouvernement du Québec avait proposé de bannir l'envoi des boues en décharge d'ici 2020 (MDDEP, 2011, gouvernement du Québec, 2012); toutefois, cet objectif n'a pas été atteint à ce jour, en 2024. Ainsi, établir une façon de diminuer, voire éliminer, l'envoi des boues de l'industrie papetière aux décharges est un projet d'envergure.

L'entreprise qui chapeaute ce projet est Cascades. Il s'agit d'une entreprise qui a été fondée en 1964 par la famille Lemaire, dans la municipalité de Kingsey

Falls, au Québec. Au début, une seule usine de pâtes et papier se comptait parmi les actifs de Cascades, mais déjà à ce moment, il s'agissait d'une usine qui utilisait une matière première recyclée pour créer du papier. L'enjeu de la gestion des déchets a donc été depuis le début de Cascades d'une grande importance. En 2024, Cascades a plus de 50 sites d'opération divisés dans 3 secteurs: le papier tissu, le papier carton-caisse, les emballages spécialisés (plastiques et de fibre thermomoulée). Il s'agit de plus de 10 000 employés en Amérique de Nord, autant aux États-Unis qu'au Canada. L'entreprise comporte aussi un secteur de gestion pour la matière première recyclée, connue sous le nom de Recovery +, qui assure un intrant stable dans la majorité de ses sites d'exploitation. Naturellement, une augmentation de production de papier à partir de source recyclée apporte une augmentation des rejets : en 2018, Cascades estime avoir produit 218 900 tonnes métriques de boue résiduelle (toutes sortes de boues combinées), en 2019, 222 680 tonnes métriques, et en 2020, 225 380 tonnes métriques. Pour diminuer son impact environnemental, l'entreprise cherche constamment à valoriser ses rejets. Entre 2019 et 2030, les cibles de diminutions des GES sont de 38.7% de tonnes métriques en usines et plans de boîtes, et de 27.5% des autres sources. De plus, l'entreprise vise une utilisation énergétique à 100% renouvelable d'ici 2030, ainsi qu'une diminution de la consommation d'eau douce de 15% de m³ par tonne métrique d'ici 2025 [10].

Dans cette optique, les objectifs généraux de ce projet sont :

- Caractériser physiquement et chimiquement la boue primaire produite par les usines Cascades de Kingsey Falls;
- Évaluer l'effet de l'ajout de la boue dans des mélanges de ciment, notamment le mortier;
- Comparer les propriétés physiques d'un mortier avec un ajout de boue primaire avec un mortier sans ajout de boue;
- Déterminer le pourcentage de boue pouvant être ajoutée au mortier ayant un impact négligeable sur les propriétés physiques de celui-ci.

Pour atteindre ces objectifs, le projet s'appuie sur les hypothèses selon lesquelles l'ajout d'une fibre dans un béton ou mortier permet de modifier certaines de ses propriétés comme la force de compression et la maniabilité. La rétention d'eau par la fibre contenue dans la boue aurait comme effet de prolonger l'hydratation du ciment en libérant de l'eau plus graduellement, tout au long de la période de curage. Ceci aurait un effet sur la réaction du ciment avec l'eau, modifiant ainsi certaines propriétés. Cependant, un ajout important de la boue dans le mélange risque d'avoir un effet néfaste en substituant la présence d'un matériau structurel comme le sable, par un matériau délicat comme la fibre [11]. D'autres articles démontrent les propriétés pouzzolaniques (qui a la propriété, en présence d'eau et de calcium réactif, de réagir avec l'eau et de former des hydrates liants) de la boue primaire activée à haute température. La question se pose alors à savoir si des effets similaires peuvent être atteints sans la consommation excessive d'énergie [12].

Chapitre 2 : Revue de littérature

2.1. L'industrie papetière

La première utilisation de fibres dans une application papetière de fibre non tressée remonte en Égypte ancienne, où le papyrus à base de carex, une graminée commune à la région, fut utilisé pour former des feuilles servant à l'écriture. Cependant, la première véritable apparition du papier comme nous le connaissons aujourd'hui remonte plutôt à l'an 220 avant J-C, durant la période Han en Chine. Trois cents ans plus tard, cette technologie trouva son chemin jusqu'en Moyen-Orient, mais il fallut attendre un autre 500 ans avant que l'industrie du papier ne se retrouve en Europe. Ce ne fut qu'en 1690 que la première usine à papier fut construite en Pennsylvanie, aux États-Unis. La technique de fabrication du papier changea peu durant tout ce temps : au départ, de vieux textiles étaient déchiquetés pour en extraire la fibre, mais avec la demande grandissante pour le papier, des fibres végétales devinrent prisées pour la facilité avec laquelle elles étaient disponibles. Aujourd'hui, celles-ci sont combinées à partir de diverses sources, notamment de bois mou ou dur, de fibre recyclée, et de fibre végétale de source alternative [13]. Le principe demeure le même : déchiqueter (ou raffiner) une fibre pour la mettre en suspension dans l'eau, avant de l'étendre sur une surface poreuse telle une toile pour en égoutter l'eau. L'optimisation du processus au fil du temps consista à augmenter la rapidité de production en utilisant des machines pouvant envoyer un jet de pâte sur une toile en mouvement rapide, à incorporer un système de pressage et de séchage pour diminuer la présence d'eau dans la feuille, à faire l'ajout d'agents chimiques pour faciliter certains aspects de formation et de nettoyage, ainsi qu'à créer des rouleaux pouvant être facilement taillés selon le besoin et transportés pour la suite du procédé.

L'incorporation de fibre recyclée donna naissance au besoin de nettoyage dans le procédé. Les ballots recyclés, contrairement à la fibre vierge, contiennent des contaminants tels des minéraux, du métal (attaches à papier, etc.), des matières collantes (colle à enveloppe et boîtes), des fibres courtes, des encres d'impression, ainsi que du plastique. Ces matières sont éliminées et triées lors du

procédé de fabrication du papier sous forme de boues, et certaines d'entre elles, comme la boue de désencrage et la boue primaire (contenant des fibres rejetées) présentent des applications subséquentes intéressantes.

Aujourd'hui, les produits de l'industrie papetière sont multiples : le papier tissu qui permet de produire le papier de toilette, mouchoir, et essuie-main et le papier d'emballage qui permet la construction de boîtes de toutes formes et tailles, ainsi que d'enveloppes d'expédition. Il faut aussi mentionner les produits spécialisés comme les contenants moulés (l'exemple le plus commun étant les récipients à œufs), ainsi que les produits thermoformés comme les barquettes servant au transport et à l'exposition de produits alimentaires. L'utilisation de fibre de cellulose, surtout de fibres recyclées, en remplacement du plastique, permet de créer des produits qui sont avant tout recyclables, en plus d'être compostables dans plusieurs cas. Ceci diminue l'impact environnemental, dans la mesure où les contenants sont adéquatement gérés après leur utilisation. En Amérique du Nord, des dizaines d'entreprises papetières produisent des dizaines de millions de tonnes métriques de papier de tous grades annuellement. En Europe, la production se situe elle aussi dans les dizaines de millions de tonnes métriques, alors que la Chine dépasse cent millions de tonnes métriques produites annuellement [14].

2.2. Les caractéristiques des fibres forestières

2.2.1. Les types de bois

La fibre papetière peut provenir de deux types de bois et ceux-ci sont identifiés selon l'origine de bois : il s'agit de bois dit 'mou', ou bien de bois dit 'dur'. Le bois mou provient d'arbres gymnospermes, soit des résineux dont la graine est à nue, comme les sapins, les conifères et les pins. Ces arbres sont caractérisés par un bois qui n'est pas poreux et moins riche en fibre. Ils contiennent plus de résine, ainsi que des fibres plus longues qui se traduisent en un gain de forces et de douceur dans l'industrie papetière. Le bois mou sera souvent utilisé dans la production de produits de tissu, soit du papier de toilette et de papiers 'mouchoir', car dans ces deux instances, la douceur est une qualité prisée chez le client.

Inversement, le bois 'dur' provient d'arbres angiospermes, soit des arbres possédant habituellement des fleurs et des graines en provenance d'un fruit, et un système poreux rempli de vaisseaux et de fibres. Les arbres feuillus comme le chêne, l'érable, le bouleau et le tremble sont des exemples de source de bois dur et leur fibre est plus courte que celle du bois mou. Ceci se traduit en une perte de force, mais une augmentation de l'absorptivité du papier produit avec cette fibre, ainsi qu'une plus grande densité. Dû à la moindre force de la fibre de bois dur, les applications dans le domaine des pâtes et papiers se limitent souvent aux papiers couchés et aux papiers d'impression. Il existe la possibilité de faire des mélanges de fibre de bois mou et de bois dur pour faire usage des qualités qui se trouvent dans les deux sources, tout en limitant la perte de forces associée aux fibres courtes [15].

La composition des fibres produites dans le bois change non seulement selon l'espèce, mais aussi en fonction des saisons, soit au printemps et à l'automne. Au printemps, alors que l'eau et les nutriments sont facilement accessibles, les couches de xylème produites seront plus larges, moins denses et plus claires. Inversement, à l'automne, alors que les nutriments se font plus rares et que l'arbre se prépare à hiberner, les couches de xylème seront plus minces, plus denses et plus foncées [16]. Ces changements ont généralement moins d'impact dans l'industrie papetière; ils sont surtout visibles lors de la coupe transversale d'un arbre, et auront un impact dans le domaine du bois de construction, surtout en ébénisterie. Effectivement, la couleur et le grain du bois seront changeants, donnant une apparence différente en fonction de la saison lors de la croissance.

2.2.2. Les composantes de la fibre

De manière très simplifiée, la constitution chimique du bois se compose principalement de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine, de matières extractibles, ainsi que de matières inorganiques. Chacune de ces composantes possède des applications spécifiques dans son rôle de composante de la fibre, mais plusieurs d'entre elles peuvent venir modifier des caractéristiques papetières. Ces

composantes varient selon l'essence du bois, mais elles se résument essentiellement selon le tableau 1 :

Tableau 1. Composition chimique grossière du bois mou et du bois dur [17].

Cellulose:	42 - 51%
Hémicellulose:	24 - 40%
Lignine:	18 - 30%
Substances extractibles:	1 - 10%
Cendres:	0,2 - 0,8%

La cellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$ est le polymère organique polysaccharide le plus présent dans la nature. Elle est à la base de la composition structurale des plantes, de certaines algues et de certains champignons. Elle peut aussi être retrouvée dans certaines espèces de bactéries, qui sécrètent de la cellulose dans leur biofilm. La figure 1 démontre la forme moléculaire, ainsi que l'unité de répétition, du polymère qu'est la cellulose :

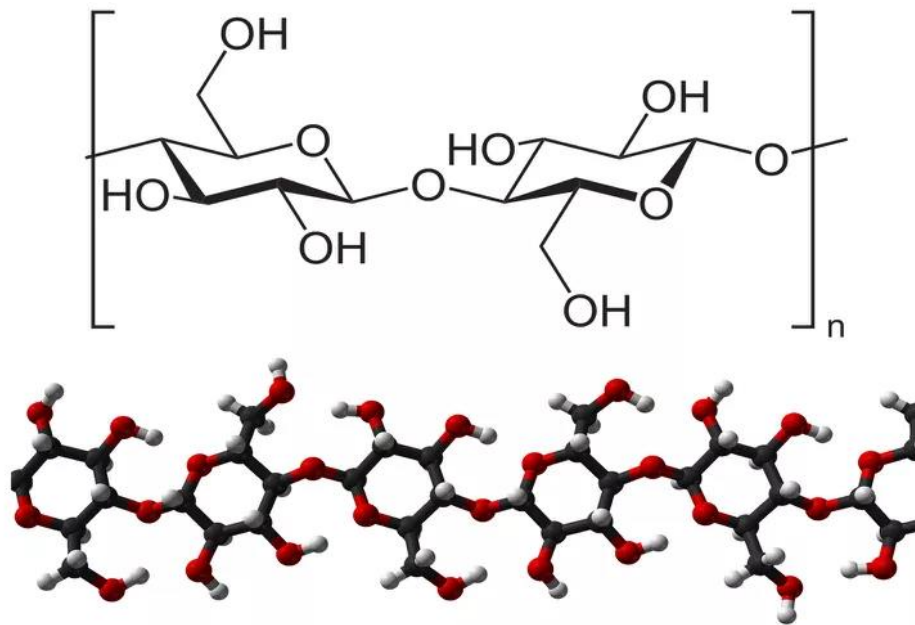


Figure 1. Forme moléculaire et unité de répétition du polymère de cellulose [18].

La cellulose est un polymère de glucose dont les unités de glucose sont connectées via des liens acétate entre les carbones C1 et C4 des glucopyranoses. Le carbone anomérique C1 est en configuration β , donc chaque glucose subit une

rotation de 180° vis-à-vis du glucose le précédent, donnant ainsi à la molécule une unité de répétition de disaccaride. Les interactions dipôle-dipôle des groupements OH des glucoses voisins permettent au polymère d'adopter une forme très linéaire, et sont à la source de sa capacité structurale [51].

Le taux de cellulose varie beaucoup selon le type de plante, mais aussi selon l'essence du bois analysé. Dans les arbres, la cellulose joue un rôle de structure, donnant de la rigidité au matériau [19]. Parmi toutes les composantes de l'arbre, la cellulose est la plus prisée dans l'industrie papetière, car c'est de ce polymère qu'est créé le papier. Cependant, il y a d'autres composantes dans le bois qui peuvent nuire à l'extraction de la cellulose pour ce domaine; il est possible de penser ici à la lignine, un autre polymère organique très complexe qui joue un rôle de liant dans la structure cellulaire des arbres, illustrés dans la figure 2:

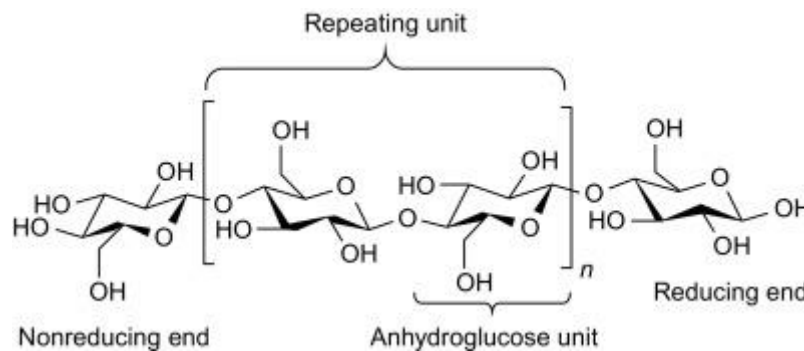


Figure 2. Forme moléculaire et unité de répétition de la cellulose [19].

La lignine accorde de la rigidité et de la protection aux cellules, car il s'agit d'une molécule qui résiste à la décomposition [19]. Cependant, quand celle-ci se retrouve dans le processus de pâte et papiers, son vieillissement tend à jaunir les papiers blancs, causant une problématique de qualité pour des grades qui requièrent de la blancheur. L'extraction de la lignine peut se faire selon des processus chimiques, thermiques ou mécaniques, mais ceux-ci sont souvent énergivores ou polluants, créant une demande pour le développement de méthodes plus douces et vertes dans le domaine. Pour accéder à la cellulose si prisée dans le domaine des pâtes et papiers, il est nécessaire de retirer la lignine des fibres en provenance du bois.

Une autre composante similaire à la lignine est l'hémicellulose, qui est un terme parapluie faisant référence à une variété de polysaccharides se trouvant dans le bois : les xyloglucanes, xylanes, mannanes, et certains glucanes, entre autres. L'abondance et la variété des hémicelluloses dans le bois varient énormément entre les différentes essences, et ces polysaccharides jouent principalement un rôle structurel de la paroi cellulaire en interagissant avec la cellulose et la lignine [20]. De la même manière, les matières extractibles dans le bois varient beaucoup entre les espèces, et le terme regroupe des produits tels les cires et graisses, les terpènes, des composés phénoliques, ainsi que des sucres et des alcaloïdes [21]. Certaines de ces molécules présentent des usages potentiels dans d'autres industries, alors que d'autres deviennent des matières inutilisables et se trouvent plutôt rejetées du procédé.

Outre les matières organiques dans la fibre de bois, il est aussi possible d'y trouver de la matière inorganique, communément appelée 'cendres', car la méthode d'analyse la plus commune pour les détecter est la combustion, qui laisse un résidu de cendres pour la matière inorganique du mélange. Il s'agit habituellement de métaux et de minéraux que les arbres extraient de leur environnement, et qui peuvent ensuite migrer dans le processus de pâtes et papiers. La présence de matière inorganique se traduit souvent en problèmes de drainage de la feuille de papier lors de sa production, car l'inorganique tend à obstruer la toile et le feutre sur lesquels la feuille en formation repose avant le processus de séchage. Ces matières inorganiques auront tendance à être retirées du procédé et se trouveront dans les boues et rejets.

2.3. Les procédés de mise en pâte

2.3.1. Procédé de mise en pâte mécanique

Le procédé de mise en pâte mécanique est un procédé qui ramollit la lignine du bois brut et brise mécaniquement la structure en fibres séparées pouvant être utilisées pour la fabrication de papier et de carton. Ce type de procédé ne cherche donc pas à séparer la lignine de la cellulose. Le résultat est donc une fibre moins durable qui aura tendance à jaunir au soleil dû à la présence de lignine. Dans une application d'emballage de carton, ce jaunissement n'est pas problématique, mais il ne peut effectivement pas être toléré pour ce qui relève du papier d'impression blanc et du papier tissu.

Le procédé de mise en pâte mécanique de meule ou 'stone groundwood pulp' (SGW) utilise la très simple action de moudre mécaniquement sur une surface de pierre les buchettes de bois pour en tirer de la fibre, le tout à température d'environ 85 à 125°C. Des températures plus élevées peuvent être utilisées, ce qui a comme action d'aider à libérer plus de lignine de la cellulose, contrant les problèmes cités plus haut. L'innovation des dernières années dans le processus a apporté la 'cuisson' de la pâte ainsi produite à des pressions à 1 bar au-dessus de la pression atmosphérique pour améliorer la délignification. Lorsque la pression est ajoutée au procédé SGW, il est plutôt question de 'pressurised groundwood pulp' (PGW). Ces processus utilisent peu ou pas de produits chimiques, mais peuvent être très énergivore, consommant 1200 à 2100 kW par tonne sèche [22].

Le procédé de mise en pâte par raffineur ou 'refiner mechanical pulp' (RMP) est en quelque sorte la version technologiquement évoluée de SGW : au lieu de procéder à un moulage sur une surface de pierre, le raffinage se produit lorsque les copeaux de bois (combinée à de l'eau pour former une pâte) sont injectés dans le raffineur, composé de deux disques métalliques composés de plaques de raffinage. Généralement, un disque est statique (le stator), alors que l'autre tourne (le rotor). La friction permet de séparer les fibres des copeaux. Celles-ci passent dans les fentes de la plaque rotatrice, subissant par la même occasion une

fibrillation qui augmente la surface de contact de chaque fibre. Le raffinage est un processus énergivore qui produit beaucoup de vapeur, et dont l'effet sur la fibre dépend de la consistance de la pâte à l'entrée du raffineur, l'énergie spécifique appliquée sur la pâte, ainsi que l'intensité du raffinage. Il existe plusieurs types de raffineurs, dont le raffineur à double disque (le plus commun et de haute intensité), le raffineur à simple disque (un des premiers à exister, et le moins dispendieux), et le raffineur à disque jumeau (un type de gros raffineur à simple disque) [23]. Lorsqu'il y a un ajout de pression dans ce genre de procédé, il faut plutôt faire allusion à la mise en pâte thermomécanique ou 'thermomechanical pulping' (TMP), car il y a ajout de chaleur et d'un environnement sous pression pour faciliter le ramollissement de la lignine. Souvent, ce processus utilise des raffineurs en chaîne, dont seulement certains sont sous pression. Le raffinage répété augmente la fibrillation des fibres, donc les composantes telles la force, mais tend à aussi couper les fibres, donc à augmenter les pertes.

2.3.2. Procédé de mise en pâte chimique

Le procédé de mise en pâte chimique consiste à faire le mélange des copeaux de bois avec un produit chimique donné pour faciliter la séparation de la lignine sur la cellulose. Habituellement, la chaleur et la pression sont utilisées pour faciliter la réaction.

Un des procédés les plus connus est celui de la pâte Kraft, aussi connu sous le nom de procédé par sulfate. Il met en œuvre la combinaison d'hydroxyde de sodium (NaOH) et de sulfite de sodium (Na_2S) dans de l'eau chaude pour faciliter la séparation de la lignine et des hémicelluloses contenues dans la fibre pour obtenir de la cellulose purifiée. Il s'agit d'un processus qui engendre plusieurs étapes autant mécaniques que chimiques, et qui tend à libérer des odeurs déplaisantes, tout en générant une importante quantité de déchets variés. Le papier formé à partir de la pâte Kraft est reconnu comme étant résistant et possédant des caractéristiques intéressantes qui lui permettent des applications variées. Ce processus génère une pâte de couleur foncée qui peut être blanchie pour en faire du papier très blanc possédant lui aussi des propriétés physiques

robustes [24]. Lorsque la fibre dans ce procédé est de provenance de bois mou nordique, elle est appelée 'Northern Bleached Softwood Kraft' (NBSK). Il s'agit d'un grade très diversifié tiré de bois résineux dont les fibres sont longues et ajoutent habituellement de la force aux papiers produits. Dans le cas de bois mou en provenance du sud (majoritairement le sud des États-Unis), il est plutôt question de 'Southern Bleached Softwood Kraft' (SBSK). Il s'agit toujours de bois résineux dont les fibres sont longues, mais celui-ci possède plutôt des capacités d'épaississement des papiers produits. Ainsi, il est plutôt utilisé dans les mélanges de papier tissu.

Un autre procédé est celui par sulfite : il est utilisé depuis longtemps pour générer une pâte plus pâle qui peut être utilisée telle quelle dans certaines applications, sans le besoin de la blanchir davantage. Le processus utilise une combinaison de raffinage mécanique avec du SO_2 acidifié et de l'ammoniac pour délignifier la fibre sous pression et dans un environnement chaud. Les rejets chimiques générés dans ce procédé sont souvent nocifs pour l'environnement et doivent être gérés de façon adéquate pour limiter leur impact négatif [25].

Un des premiers procédés de mise en pâte chimique a été celui de la cuisson au Soda. Celui-ci ressemble au procédé Kraft, car il fait usage de l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour délignifier la cellulose, mais sans l'usage de sulfate ou de sulfite. Il faut noter que l'absence du sulfate de sodium a comme conséquence de générer une pâte moins robuste que le procédé Kraft. Un ajout de carbonate de sodium (Na_2CO_3) et d'oxyde de calcium (CaO) permet à la pâte d'acquérir une couleur plus blanche qui peut alors lui épargner une étape de blanchiment [26].

Dans tous les cas, peu importe le choix de matière première, le procédé papetier génère des résidus. Le plus important parmi ceux-ci s'avère à être la boue papetière, qui sera détaillée plus bas.

2.4. Les boues papetières

2.4.1. Définition et types de boues

Les boues papetières se divisent en trois grandes catégories : les boues primaires, secondaires, et de désencrage. La vaste majorité de boues est produite lors de l'utilisation de matière première recyclée, car elles consistent en des rejets générés lors de la formation de la feuille de papier ou de carton. La figure 3 permet de visualiser grossièrement à quelle partie du procédé les boues papetières sont produites, ainsi que le type d'énergie utilisé pour accomplir le travail :

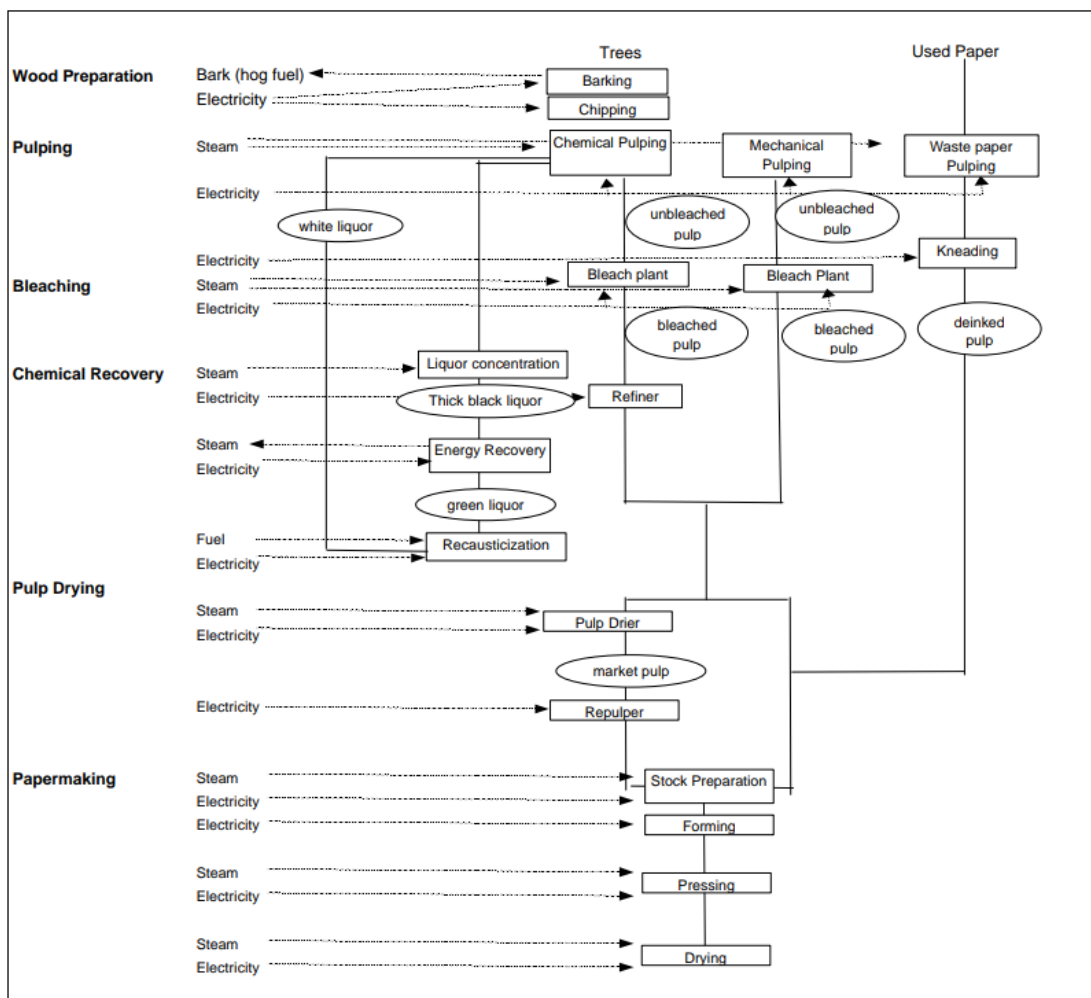


Figure 3. Schéma visualisant le procédé des pâtes et papiers [27].

Le processus commence par la transformation de bois en copeaux de bois, pour ensuite faire la transition vers la fibre détachée d'un maximum de lignine.

Cette pâte ainsi formée peut être utilisée telle quelle, ou être transformée davantage, souvent dans un processus de blanchiment pour changer sa coloration. Dans la figure 4, un processus de collecte chimique est mentionné, mais il ne sera pas exploré davantage ici : il s'agit d'un procédé qui récolte les résidus de cuisson des copeaux de bois, et ne concerne pas les rejets de boue. Ensuite, la feuille de papier est formée sur la machine, avant d'être acheminée sous forme de rouleau pour sa transformation sur le site même, ou sur un site externe. Le processus de papier fait à partir de fibre recyclée omet la partie de transformation de copeaux, qui se remplace plutôt par le transport de papier usagé vers les usines de pâtes et papiers, où celui-ci sera remis en pâte avec de l'eau, et entamera le processus de nettoyage de la pâte de l'usine. Ce processus peut varier d'une machine à l'autre, mais il se résume essentiellement à une série d'équipements servant à éliminer les matières contaminantes de la matière première utilisée : le verre, métal et autre matière lourde sont éliminés dans les premières étapes. Par la suite, le procédé entame le nettoyage de matières plus légères, tels le plastique, la styromousse, et les matières collantes. Il faut ajouter les fibres fines à cette longue liste de contaminants : il s'agit de fibres qui, au long du processus de traitement et de recyclage répété, ont été suffisamment abimées pour s'écourter et ne plus être viables dans la formation d'une nouvelle feuille de papier.

La figure 4 permet de visualiser la différence entre les boues dites 'primaire', et les boues dites 'secondaires', au niveau des rejets :

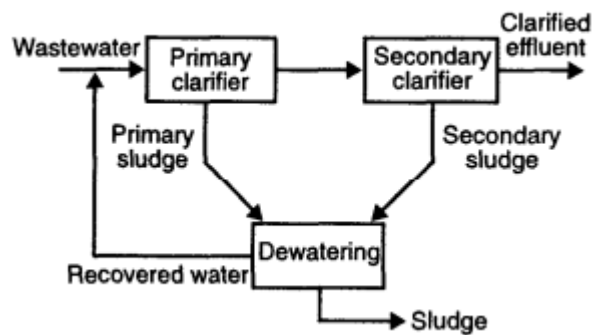


Figure 4. Schéma illustrant le processus de clarification des eaux usées du procédé papetier [28].

La boue primaire est surtout produite lors de l'utilisation de fibre vierge dans le procédé des pâtes et papiers et dans un procédé qui utilise de la matière recyclée, la boue primaire est aussi agrémentée de boue secondaire. Les appellations proviennent de la partie du procédé qui rejette la boue, soit du clarificateur primaire, ou secondaire. Un clarificateur est un bassin de rétention dans lequel le rejet de procédé est acheminé : avec une lente décantation, et un ajout de produits chimiques, les fibres et autres matières inorganiques sont floculé vers le fond du bassin, où elles sont pompées vers une presse qui permet d'éliminer l'eau du mélange. Ceci a pour but de maximiser la masse de déchet qui est ensuite transportée, en diminuant la masse de l'eau dans celle-ci. Non seulement cette opération est bénéfique d'un point de vue monétaire, car le transport de la boue est souvent chargé au poids, mais il y a un aspect environnemental de maximiser la quantité d'eau qui peut être envoyée à nouveau dans le système, et ainsi réutilisée localement.

Ainsi, la boue primaire représente un processus de passage plus rapide dans le système de rejets d'une usine. Ceci donne une boue bactériologique moins active que la boue secondaire, et dont les fibres présentent souvent encore un usage potentiel. Il s'agit donc principalement de fibres trop courtes ou coupées lors du procédé de transformation ou de raffinage. Dans les années 90, le pourcentage de boue primaire produite au Canada dans les déchets du procédé de pâtes et papier était d'environ 42%. La boue secondaire, elle, est produite lors

du traitement secondaire de l'eau blanche dans le procédé. Il s'agit d'une boue agrémentée de composantes organiques diverses, et dont l'activité bactériologique est très élevée. Dans les années 90, la boue secondaire représentait 26% des rejets produits annuellement au Canada, alors que la boue combinée était de 18% [29]. La boue combinée fait référence à un mélange de boue primaire et de boue secondaire, une action souvent effectuée dans le but de faciliter le drainage des boues à la presse. La boue de désencrage, quant à elle, provient des cellules de flottaison des usines qui utilisent de la matière recyclée avec un contenu en encre. L'encre est séparée de la fibre dans des cellules de flottaison, où des jets de bulles très fines permettent à celle-ci de flotter à la surface et d'être séparée de la fibre qui sera réutilisée.

2.4.2. Traitement des effluents et revalorisation de la boue

L'eau usée produite lors du procédé des pâtes et papiers est souvent partiellement traitée sur les lieux mêmes de l'usine où elle est produite. Le but de ce processus est de maximiser la réutilisation de l'eau puisée d'une source fraîche pour diminuer les coûts liés à la consommation de l'eau douce, ainsi qu'à limiter l'impact environnemental de cette consommation. Les usines à papier sont généralement dotées d'immenses bassins de décantation dans lesquels le mélange d'eau, de minuscules déchets légers (plastique et styromousse) et de fibre rejetée est acheminé. Ces bassins combinent des produits chimiques flocculants qui permettent aux fibres de se lier les unes aux autres pour former des masses assez denses pour couler dans le fond du bassin. Des râpeaux en rotation lente récoltent tout matériel contaminant léger à la surface du bassin pour l'envoyer vers les rebuts. Une présence bactérienne contribue à la digestion de la matière organique du bassin, mais dans plusieurs cas, une présence bactérienne trop importante peut conduire à un effet de flottaison avec la libération de gaz produit par les bactéries, rendant le processus de décantation inefficace. L'ajout d'un agent chimique permet aux boues de flocculer dans le bas du bassin, où elles sont évacuées et acheminées vers la presse. À la sortie de ce procédé du traitement des eaux, les boues possèdent une siccité de l'ordre de 1.5 à 5 % généralement, mais en subissant un pressage mécanique (souvent agrémenté de

produits chimiques servant à faciliter le drainage), les boues peuvent atteindre une siccité de 50 %. La boue secondaire est habituellement utilisée en combinaison avec la boue primaire pour faciliter le pressage de cette dernière, créant ainsi un combiné. Dans tous les cas, les boues pressées sont acheminées par la suite vers divers sites de transformation, souvent dans le but d'être revalorisée. Au Canada, elle est habituellement utilisée en amendement de sols pour la revalorisation agricole, comme matériau en enfouissement des mines exploitées, comme source d'énergie thermique, ainsi qu'en biométhanisation.

Le but de l'amendement de sol est d'enrichir une terre agricole de matières organiques qui augmenteront la rétention d'eau, de minéraux et des bactéries qui permettront un meilleur rendement de production dans les années suivantes. À force d'exploiter une terre pour la cultiver, celle-ci perd de sa valeur nutritive : les minéraux s'y trouvant sont consommés par les plantes, qui ensuite sont retirées du site. Comme celles-ci sont retirées et ne complètent pas un cycle naturel de décomposition, la terre se trouve appauvrie d'une génération à l'autre si aucune source d'oligoéléments n'y est apportée. Les boues papetières, riches en minéraux et en matière organique décomposable, peuvent alors être ajoutées aux terres agricoles pour pallier ce problème. Cette application permet de donner une 'seconde vie' à ce qui serait habituellement considéré comme un déchet [30].

Utiliser la boue comme remblais dans des sites d'exploitation minière permet d'apporter une matière organique compostable dans un environnement appauvri, un peu de la même façon que dans le cas de l'amendement de sol. Au lieu d'enfouir la boue dans une décharge, la mélanger à de la roche et de la terre permet de créer un environnement riche et propice à la régénération. Ceci permet aux anciens sites miniers de devenir, avec le temps, de nouvelles forêts et zones habitables, au lieu d'en faire des sites où peu de végétation peut survivre. Le but de ce genre d'opération est d'ajouter une valeur sauvegardant l'environnement, autant dans l'industrie papetière que dans l'industrie minière.

L'utilisation des déchets industriels comme carburant permet de valoriser ceux-ci sans les envoyer inutilement à la décharge. Dans le cas de la boue

papetière, il faut considérer le taux de siccité du matériau : celui-ci se situe souvent autour de 50% à la sortie des presses. Il faut donc procéder à un séchage adéquat, souvent à air libre pour éviter de consommer de l'énergie à cette partie du processus. Ensuite, le matériau est utilisé dans des centrales thermiques pour être brûlé et générer de la chaleur, qui pourra être convertie en énergie. Il est important de mentionner que la boue papetière possède en moyenne un pouvoir calorifique de 4.5 MJ/Kg [31], comparativement à 18.5 à 19 MJ/Kg [32] pour le bois. Il s'agit donc d'une nette perte comparativement à des sources plus calorifiques, et la boue doit préférablement être utilisée en combinaison à d'autres combustibles. Il ne s'agit donc pas d'une application particulièrement fonctionnelle pour ce type de déchet, et d'autres applications devraient être explorées.

Pour ce qui en est de la biométhanisation (aussi connue sous le nom de digestion anaérobique), il s'agit d'un autre type de procédé permettant de générer une source d'énergie à partir de la boue. Celle-ci est décomposée de manière naturelle en utilisant des bactéries en conditions anaérobique qui génèrent du méthane gazeux lors de la digestion. Ce méthane est alors récolté et utilisé comme combustible. Les avantages à utiliser la biométhanisation de la boue sont de générer une valeur économique ajoutée à un déchet, de réduire les odeurs associées à la dégradation naturelle de celle-ci, ainsi que de réduire la quantité de déchets bruts produits, tout en promouvant une approche énergétique 'verte' dans l'industrie [33].

2.4.3. Réglementation

Au Canada, les réglementations régissant le traitement des boues produites par l'industrie papetière relèvent principalement de la législation environnementale fédérale et provinciale, ainsi que des lignes directrices établies par des organismes de réglementation tels que le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) et les agences provinciales de l'environnement.

La loi canadienne sur la protection de l'environnement de 1999 (LCPE) [34] fournit un cadre pour la réglementation des substances qui peuvent être nocives pour l'environnement ou la santé humaine. Selon LCPE, les substances

désignées comme toxiques sont soumises à des mesures d'évaluation et de gestion, qui peuvent inclure des réglementations pour le traitement et l'élimination des déchets associés, y compris les boues de l'industrie papetière. Chaque province canadienne possède sa propre législation environnementale régissant la gestion des déchets industriels, y compris les boues de l'industrie papetière. Ces réglementations traitent généralement de la caractérisation des déchets, les exigences en matière de traitement, le stockage, le transport et les méthodes d'élimination. Les provinces peuvent également adopter les lignes directrices et les normes établies par le CCME [35], ou élaborer leurs propres règlements adaptés aux conditions et aux priorités environnementales locales. Le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) élabore des lignes directrices et de meilleures pratiques environnementales nationales pour aider les provinces et les territoires à gérer divers types de déchets, y compris les boues industrielles. Ces lignes directrices fournissent souvent des recommandations sur les technologies de traitement, la caractérisation des déchets, les exigences en matière de surveillance et l'évaluation des risques pour l'environnement. Il est à noter que certaines provinces peuvent avoir mis en place des réglementations spécifiques à l'industrie ou des accords volontaires concernant la gestion des boues produites par l'industrie des pâtes et papiers. Ces réglementations peuvent inclure des exigences en matière de prévention de la pollution, de réduction des déchets et de mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement.

Il existe cependant trois grandes réglementations quant aux contaminants d'ordre biologique présents dans les effluents des industries papetières. On parle ici de l'analyse de létalité des effluents, qui observe la survie de *Daphnia magna*, une espèce de crustacé présent dans les eaux douces, de l'analyse de DBO (demande biologique en oxygène), ainsi que l'analyse de MES (matière en suspension).

La létalité des effluents est déterminée par la survie des *Daphnia magna* exposés à des effluents papetiers; leur taux de survie doit être supérieur à 50% lorsque ceux-ci sont exposés pendant 48 heures à un effluent à 100% de sa

concentration. Sous le seuil de 50% des individus survivants, l'effluent est considéré comme toxique pour l'environnement. Quant à elle, l'analyse de DBO doit se faire en dedans de 48 heures suivant l'échantillonnage, et la demande d'oxygène devrait se situer entre 30 et 60%. Les limites d'acceptation des MES peuvent varier, et cette analyse sert principalement à quantifier et qualifier les solides suspendus dans les effluents [36].

La réglementation pour l'épandage de matière organique résiduelle fertilisante (MRF) au Canada définit la boue papetière comme un biosolide, soit : « Les biosolides, traditionnellement appelés « boues d'épuration », proviennent du traitement primaire des eaux usées (biosolides primaires), ou du traitement secondaire (biosolides secondaires), et sont souvent combinés (biosolides mixtes). Ces biosolides peuvent provenir du traitement d'eaux usées municipales ou industrielles. Ils sont utilisés comme amendements organiques des sols ou comme source d'éléments fertilisants (N-P-K, etc.). Pour être considérée comme un biosolide, une boue d'épuration doit répondre aux critères de désinfection et de qualité microbiologique mentionnés au tableau 8.3. ». Il est aussi à noter que la différence entre les biosolides et les boues se résume ainsi : « À la différence des boues, les biosolides ont subi un traitement pour diminuer ou éliminer les organismes pathogènes, sauf dans les cas où ils n'en contiennent pas de façon importante au départ. Un biosolide doit également avoir une siccité minimale de 0,5%, sinon on considère qu'il s'agit d'une eau usée. » [37]. L'information en rapport avec les biosolides papetiers en provenance du tableau 8.3 de ce document se trouve dans le tableau 2 :

Tableau 2. Section du tableau 8.3 du guide de recyclage des matières résiduelles fertilisantes – 2015 [37].

Résidus	Options de catégorie P1	Options de catégorie P2
Biosolides papetiers (non contaminés par des matières fécales) ⁽¹⁾	Salmonelles non détectées ⁽²⁾ pour au moins 2 échantillons sur 3 ⁽³⁾ et attestation écrite du responsable du service de l'environnement de la papetière, à savoir qu'aucune eau usée municipale ou sanitaire n'est déversée dans le système de traitement des eaux usées industrielles ⁽¹⁾ .	Attestation écrite du responsable du service de l'environnement de la papetière, à savoir qu'aucune eau usée municipale ou sanitaire n'est déversée dans le système de traitement des eaux usées industrielles ⁽¹⁾ .

Il n'existe aucune restriction quant à la présence de polymères dans les MRF. Aux États-Unis et en France, plus de 55% des boues sont utilisées comme

engrais, et la majorité contient des polymères. L'ajout de polymères est plutôt géré en amont dans le processus, car ceux-ci sont dispendieux et il est diligent de ne pas les gaspiller. De plus, alors que l'agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) impose des restrictions quant à l'épandage des polymères concentrés dans les milieux agricoles servant à la culture alimentaire, le fait que les biosolides sont habituellement dilués par un facteur de 1000 permet de facilement respecter les restrictions en place. De la même manière, des contaminants tels que les PBDE (polybromo diphenyles éthers), hydrocarbures pétroliers, composés organiques halogénés, biphenyles polychlorés, le baryum, les radionucléides et le thallium sont considérés comme très dilués dans toute boue en épandage et ne sont pas activement analysés.

2.4.4. Caractérisation physico-chimique de la boue primaire

La composition physico-chimique des boues primaires provenant de l'industrie papetière peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de pâte utilisé (la matière première), le processus de fabrication et les opérations spécifiques de l'usine de papier. Toutefois, les boues primaires se composent généralement de matières solides organiques et inorganiques, d'eau et de divers constituants chimiques.

Les boues primaires contiennent des matières organiques telles que des fibres de cellulose, de la lignine, de l'hémicellulose et d'autres composés organiques dérivés de la pâte de bois au cours du processus de fabrication du papier. Ces substances organiques contribuent à la masse des boues et peuvent avoir un impact sur leur biodégradabilité et leur potentiel de récupération d'énergie par digestion anaérobie [38].

Les solides inorganiques présents dans les boues primaires peuvent inclure des charges minérales, des particules d'argile, du carbonate de calcium (provenant des revêtements du papier ou des processus de désencrage) et d'autres matériaux inertes présents dans la pâte ou introduits au cours de la fabrication du papier. Ces particules peuvent affecter les propriétés physiques des boues et influencer leurs caractéristiques de décantation.

Les boues primaires contiennent généralement une quantité importante d'eau, qui est utilisée à différents stades du processus de fabrication du papier et reste piégée dans la matrice des boues. La teneur en eau des boues primaires peut varier en fonction des méthodes de déshydratation employées par l'usine de papier et peut aller de 50 % à 60 %, ou plus. Il y a une variabilité dans la composition chimique des boues qui dépend de la provenance des fibres qui ont mené à celle-ci, comme démontré dans le tableau 3 :

Tableau 3. Composition physico-chimique de boue résultant du traitement des fibres de diverses sources [28].

Source	Analysis (%)							Heating value (MJ/kg)
	Solids	Ash	C	H	S	O	N	
Bleached pulp mill (9)	33.4	1.9	48.7	6.6	0.2	42.4	0.2	20.1
Pulp mill (10)	42.0	4.9	51.6	5.7	0.9	29.3	0.9	21.5
Kraft mill (11)	37.6	7.1	55.2	6.4	1.0	26.0	4.4	24.1
Kraft mill (12)	40.0	8.0	48.0	5.7	0.8	36.3	1.2	19.8
Deinking m (10)	42.0	20.2	28.8	3.5	0.2	18.8	0.5	12.0
Deinking mill (10)	42.0	14.0	31.1	4.4	0.2	30.1	0.9	12.2
Recycle mill (13)	45.0	3.0	48.4	6.6	0.2	41.3	0.5	20.8
Recycled paper mill (11)	50.5	2.8	48.6	6.4	0.3	41.6	0.4	20.6
Bark (12)	54.0	3.5	48.0	6.0	0.1	42.1	0.3	20.3
Baric(10)	50.0	0.4	50.3	6.2	0.0	43.1	0.0	20.8
Wood chips (11)	79.5	0.2	49.2	6.7	0.2	43.6	0.1	19.4
Wastepaper (14)	92.0	7.0	48.7	7.0	0.1	37.1	0.1	25.0

Dans ce tableau, il est possible de remarquer que le taux de cendres est nettement plus élevé pour les boues de désencrage. Ceci est en lien avec les encres elles-mêmes, dont les pigments se composent de matière inorganique. Comme l'analyse des cendres se fait habituellement avec une combustion à 525°C, la combustion élimine les matières organiques, laissant derrière ce qui est inorganique. Sans quoi, il faut aussi remarquer que le potentiel calorifique pour les boues de désencrage est plus bas, ce qui coïncide avec un plus faible taux de carbone en provenance de la fibre, comparativement aux autres types de boues.

Finalement, ces boues peuvent contenir divers constituants chimiques provenant des produits chimiques de traitement, des additifs et des contaminants introduits pendant le traitement de la pâte et la production de papier. Ces constituants peuvent inclure des produits chimiques résiduels de réduction en pâte

(par exemple, hydroxyde de sodium, sulfure de sodium), des agents de blanchiment (par exemple, chlore, dioxyde de chlore), des agents d'encollage et des traces de métaux (par exemple, calcium, magnésium, fer) prélevés sur la pâte ou sur l'équipement [39] [40]. Le tableau 4 détaille (en pourcentage relatif au poids), la composition d'une boue primaire tirée de l'industrie du tissu papetier :

Tableau 4. Composition chimique de la boue primaire de l'industrie du papier tissu [41].

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	CaO	C
Primary sludge	8.03	9.46	0.65	1.25	0.40	0.86	70.84	16.8

La présence de silice, et d'oxyde de titane provient des pigments souvent utilisés dans le domaine. De même, ces éléments correspondent à ceux qui ont été identifiés, lors d'une analyse par diffraction des rayons X dans la figure 5 :

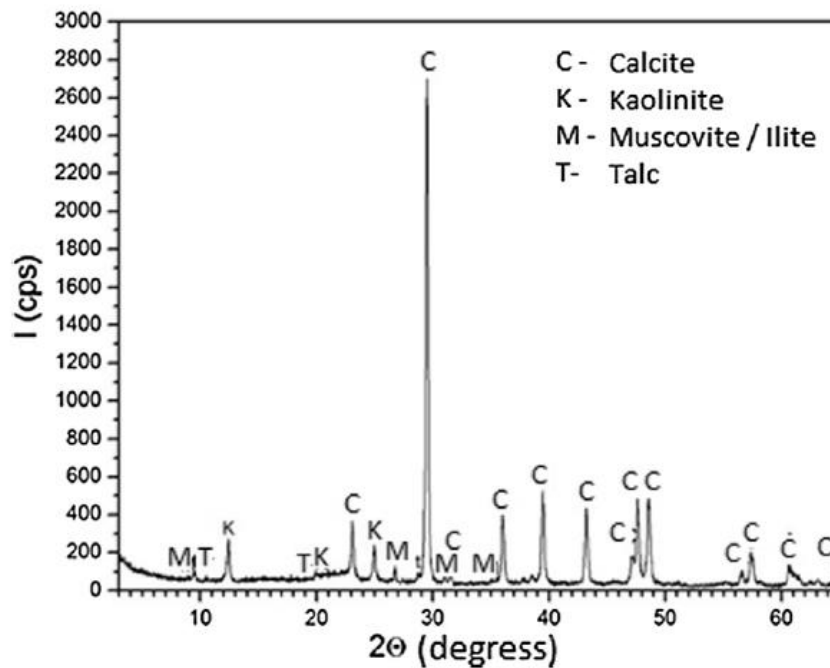


Figure 5. Analyse par diffraction des rayons X de la boue primaire [41].

La kaolinite, la muscovite et le talc sont des molécules qui comportent de la silice, de l'aluminium, du fer et de l'oxygène, entre autres. En somme, la boue primaire se caractérise par sa forte composition en cellulose (comparativement aux autres

rejets produits dans le procédé des pâtes et papiers), ainsi qu'à son taux d'humidité élevé. En plus de la cellulose ($C_{12}H_{20}O_{10}$), la boue primaire contient de la calcite ($CaCO_3$), de la muscovite ($(Al_2O_3)_3(SiO_2)_6K_2O(H_2O)_2$), du talc ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), de la kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), ainsi que du quartz (SiO_2). Il a été démontré que cette boue possède des propriétés pouzzolaniques dues au kaolin présent dans le mélange, qui se transforme en metakaolin à des températures de 500 à 900°C [42]. Les matériaux à propriétés pouzzolaniques sont composés à la base de silice ou d'aluminium et possèdent peu ou pas de propriétés cimentieuses qui leur sont propres. Cependant, quand ils sont finement broyés et exposés à l'eau, ils réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés aux propriétés de ciment.

2.5. L'industrie du ciment

Comme pour le papier, il est tout vraisemblable que le précurseur du ciment a vu le jour en Égypte ancienne, en l'an 2600 av. J.-C. lors de la construction des pyramides de Gizeh. Les Égyptiens utilisaient alors un matériau à base gypse pour solidifier leurs constructions. Cependant, le ciment tel qu'il est connu aujourd'hui a plutôt été développé par Joseph Aspdin, un franc-maçon du 19^e siècle qui fut le premier à utiliser un mélange chauffé de calcaire et de glaise pour créer le premier ciment qui durcit en présence d'un ajout d'eau. Dès lors, l'appellation de ciment de Portland fut établie en raison de la ressemblance entre le matériau ainsi produit, et une roche extraite sur l'Isle de Portland, en Grande-Bretagne.

Le ciment d'aujourd'hui est une combinaison de calcium, de silice, d'aluminium et de fer. Les gisements de ces matériaux se trouvent souvent à proximité des usines de fabrication pour minimiser le coût de transport. Le ciment de Portland peut être produit de deux façons : par la méthode sèche, ou par la méthode humide. La méthode sèche consiste en la combinaison des ingrédients sous forme de poudre fine, et de leur cuisson dans un four, alors que la méthode humide consiste en l'ajout d'eau aux ingrédients avant leur pulvérisation en poudre fine, pour ensuite procéder à la cuisson au four. Les fours atteignent les 1430 à 1650°C, températures auxquelles les matériaux fusionnent et créent des grumeaux qui seront par la suite refroidis, avant d'être combinés à du gypse et d'être broyés finement en ce qui s'appelle du ciment [43]. Le diagramme ici-bas résume bien le processus de formation du ciment, débutant dans le four avec les matériaux mentionnés précédemment, avant de faire un ajout d'eau et une augmentation graduelle de la température. L'argile et le calcaire se décomposent pour former des composés du ciment, avant de s'agglomérer et de finalement refroidir pour quitter le four, tel qu'illustré dans la figure 6 :

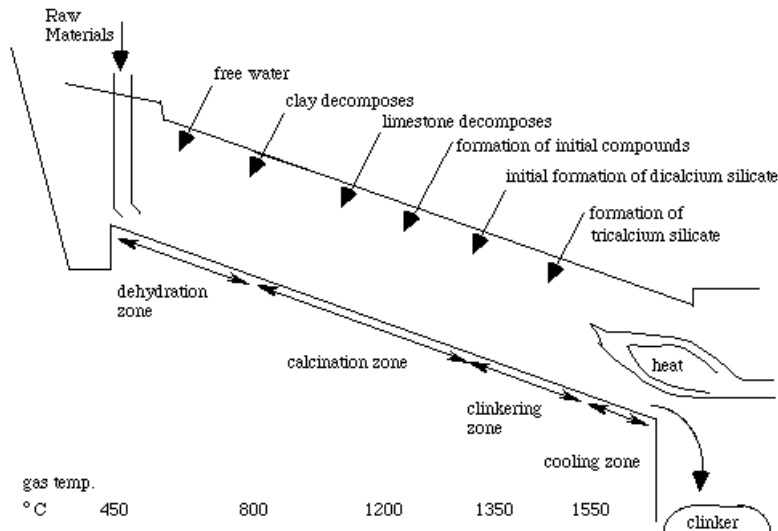


Figure 6. Diagramme de la formation du ciment à partir des matériaux bruts [44].

Le ciment ainsi produit est souvent mélangé à du sable ou à de la pierre pour devenir alors du mortier, ou du béton. Celui-ci possède entre autres des applications dans le domaine de la construction, soit dans l'habitation, les routes, les quais maritimes, les écoles, hôtels et hôpitaux, ainsi que des applications plutôt décoratives comme l'ameublement, le paysagement et les projets de petite envergure. La grande versatilité du béton est éclipsée par sa forte production de gaz à effet de serre, sa consommation énergétique, ainsi que son approvisionnement en matériaux. Le fait de pouvoir augmenter les propriétés du ciment, tout en diminuant la quantité qui doit être utilisée en, disons, ajoutant de la boue primaire de l'industrie papetière, permettrait de mitiger certains aspects négatifs de l'industrie.

2.6. Le ciment, le béton et le mortier

2.6.1. Définitions et types de ciment

Le ciment se définit comme un agent liant dans les mélanges de béton et de mortier. Il s'agit d'une fine poudre composée de calcaire, d'argile, de coquillages et de sable, ainsi que de silice. Ce mélange peut être combiné à d'autres, notamment au fer, avant d'être chauffé à 2700°F et broyé pour former une poudre très fine. Le terme 'ciment' est souvent interchangé avec 'béton', mais en réalité le béton est plutôt un matériau composé de ciment, de sable et de

gravier. Il est aussi possible d'utiliser le terme 'agrégat' pour nommer les matériaux ajoutés dans le ciment pour en faire du béton. Le choix d'agrégat se fera habituellement selon le grade de béton désiré, qui dépend de la résistance nécessaire de celui-ci. Un béton ultraléger sera composé de vermiculite, céramique et perlite, et servira souvent comme isolant. Un béton léger utilisera de l'argile ou de la brique, et sera utilisé comme isolant ou comme base des structures légères. Un béton normal sera composé de calcaire, de sable, de gravier et de béton broyé recyclé, et sera utilisé dans des projets habituels tels que la construction de bâtiments. Finalement, un béton lourd sera composé de billes de fer et servira habituellement comme pare-radiation [44].

Celui-ci sert à la construction dans divers domaines, notamment dans l'industrie de l'immobilier et pour le domaine des transports. Finalement, le terme 'mortier' fait allusion à un mélange de ciment et de sable. L'absence de gravier dans le mélange signifie que le mortier est beaucoup moins résistant que le béton, et est plutôt utilisé comme 'colle' pour divers matériaux rocheux [45]. Il est possible ici de penser au fixatif utilisé avec les briques ou pierres des champs utilisées dans la construction de maisons.

La Société américaine pour les Tests et Matériaux (ASTM) [46] mentionne huit types de ciment de Portland dans ses applications potentielles :

- Type I - À utiliser lorsque les propriétés spéciales spécifiées pour tout autre type ne sont pas requises.
- Type IA - Ciment entraîneur d'air pour les mêmes utilisations que le type I, où l'entraînement d'air est souhaité.
- Type II - Pour une utilisation générale, plus particulièrement lorsqu'une résistance modérée aux sulfates est souhaitée.
- Type IIA - Ciment entraîneur d'air pour les mêmes utilisations que le type II, où l'entraînement d'air est souhaité.
- Type II (MH) - Pour une utilisation générale, plus particulièrement lorsqu'une chaleur d'hydratation modérée et une résistance modérée aux sulfates sont souhaitées.

- Type II(MH)A - Ciment entraîneur d'air pour les mêmes utilisations que le Type II(MH), où l'entraînement d'air est souhaité.
- Type III - À utiliser lorsqu'une résistance initiale élevée est souhaitée.
- Type IIIA - Ciment entraîneur d'air pour le même usage que le type III, où l'entraînement d'air est souhaité.
- Type IV - À utiliser lorsqu'une faible chaleur d'hydratation est souhaitée.
- Type V - À utiliser lorsqu'une résistance élevée aux sulfates est souhaitée.

Certains ciments peuvent être combinés à de la cendre, de la silice ou des mélanges de silice et aluminium (communément appelés pouzzolanes) pour former des ciments de standards ASTM C595 [46] ou C1157, soit :

- Type GU - ciment hydraulique mélangé pour la construction générale.
- Type HE - ciment à haute résistance initiale.
- Type MS - ciment modérément résistant aux sulfates.
- Type HS - ciment hautement résistant aux sulfates.
- Type MH - ciment à chaleur d'hydratation modérée.
- Type LH - ciment à faible chaleur d'hydratation.

Le but de ces mélanges est d'adapter le ciment à des conditions réactionnelles variées, soit des températures, humidités et présences chimiques qui peuvent différer selon les régions, le temps de l'année, et les projets sélectionnés.

2.6.2. Réglementation

Au Canada, la résistance du béton utilisé comme matériau de construction est réglementée par le Code national du bâtiment du Canada (CNBC), qui définit les normes de construction et les exigences en matière de sécurité. Les exigences spécifiques relatives à la résistance du béton sont décrites dans la partie 4 du CNBC, intitulée "Calcul des structures", et dans la norme CSA A23.1 [47], "Matériaux et méthodes de construction en béton/Méthodes d'essai pour le béton". Le CNBC et la norme CSA A23.1 spécifient différentes classes de béton, chacune avec ses exigences minimales de résistance à la compression mesurée en mégapascals (MPa). Ces exigences dépendent de facteurs tels que le type de

construction, les conditions environnementales et l'utilisation prévue du béton. Par exemple, les exigences courantes en matière de résistance du béton dans les applications structurelles sont les suivantes :

- Béton de poids normal : Résistance à la compression minimale spécifiée de 20 MPa à 28 jours pour un usage structurel général.
- Béton à haute résistance : Béton dont la résistance à la compression est supérieure à 50 MPa, adapté à des applications spécialisées nécessitant une résistance plus élevée.
- Béton spécial : Les mélanges de béton conçus pour des applications spécifiques, comme le béton à haute performance ou le béton autoplaçant, peuvent avoir des exigences de résistance personnalisées.

Ces réglementations comprennent également des dispositions relatives au contrôle de la qualité pendant la production du béton, aux procédures d'essai et à la certification des matériaux et des pratiques de construction afin de garantir la conformité avec les exigences de résistance spécifiées [48]. Il est important de noter que les exigences spécifiques peuvent varier en fonction des codes de construction provinciaux ou municipaux, des spécifications du projet et des considérations de conception technique.

Le code de construction du Québec stipule que le bétonnage des petits bâtiments doit être conforme à la norme A438: Travaux de béton pour maison et petits bâtiments, ainsi qu'à la norme A23.1. Cette norme stipule, entre autres, qu'il ne doit pas s'écouler plus de 120 minutes entre le début du malaxage et la fin du déchargement du béton du malaxeur. Le béton des petites constructions doit contenir entre 5 et 8% d'air entraîné pour améliorer la résistance au gel et au dégel et une humidité doit être apportée (par nappe d'eau, arrosage, toile imbibée d'eau, papier imperméabilisant, pellicule de plastique ou membrane) pour éviter la fissuration en lien avec une déshydratation de surface. Les températures à respecter se situent entre 5°C et 30°C, et le temps de curage dans les dalles de coffrage sont de minimum 3 jours, alors que le temps de curage une fois les dalles enlevées est de 24 heures supplémentaires.

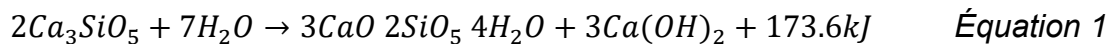
2.7 Les mécanismes de réaction du ciment

La compréhension générale sur la réaction du ciment dans le béton est habituellement, à tort, que le mélange s'assèche avec le temps. En fait, il s'agit d'une réaction d'hydratation des molécules se trouvant dans le ciment, d'où l'importance de l'eau dans le mélange. La composition chimique typique du ciment se résume selon le tableau 5 :

Tableau 5. Composantes du ciment en pourcentage de poids [44].

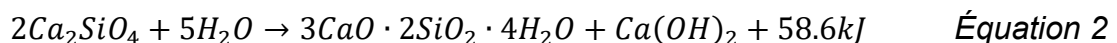
Cement Compound	Weight Percentage	Chemical Formula
Tricalcium silicate	50 %	Ca_3SiO_5 or $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Dicalcium silicate	25 %	Ca_2SiO_4 or $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Tricalcium aluminate	10 %	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ or $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$
Tetracalcium aluminoferrite	10 %	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ or $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
Gypsum	5 %	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Avec l'ajout de l'eau, ces molécules subissent un processus d'hydratation qui peut prendre plusieurs jours. De ces composantes, seul le silicate de calcium contribue à la force du produit final; le silicate de tricalcium, plus spécifiquement, donne la force au début de la réaction (en dedans des sept premiers jours), alors que le silicate de dicalcium contribue à la force à long terme. L'hydratation du silicate de tricalcium se résume selon l'équation 1 :



La présence d'énergie après la réaction signifie que celle-ci est exothermique.

Quant à lui, le silicate de dicalcium s'hydrate beaucoup plus lentement, et dégage moins de chaleur. Ceci explique notamment sa contribution à la force de compression sur une période plus longue. La raison derrière ce phénomène est que, tout simplement, le dicalcium est moins réactif que le tricalcium. Le tout s'effectue selon l'équation 2 :



Les autres composantes du ciment contribuent peu aux forces du mélange final. Dans un ordre croissant de réactivité, la totalité des composantes se classe comme suit : silicate de dicalcium, aluminoferrite de tetracalcium, silicate de tricalcium et aluminat de tricalcium. Il est à noter que la vitesse de réaction de chaque composante est dépendante de la concentration des autres composantes.

Comme mentionné plus haut, la réaction d'hydratation du ciment dégage de la chaleur. Celle-ci est variable dans le temps, avec des maximums dans le premier 15 minutes suivant l'ajout de l'eau, et entre 12 et 20 heures après cette période. La figure 7 illustre le concept :

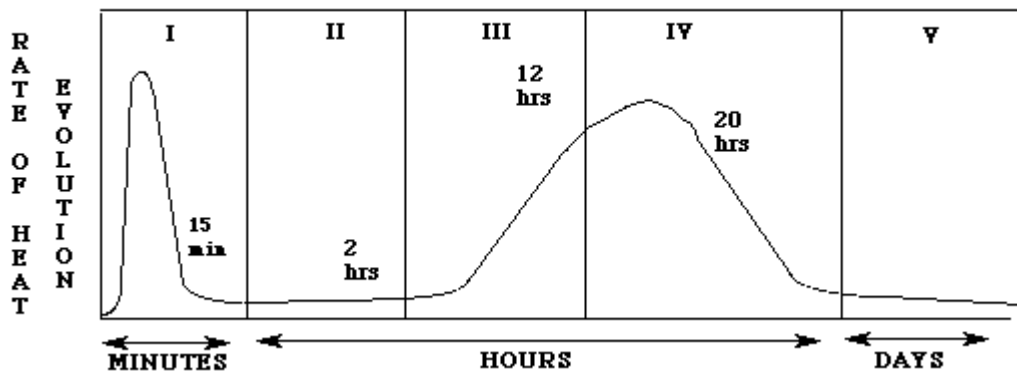


Figure 7. Évolution de la chaleur produite dans la réaction d'hydratation du ciment [44].

Les étapes I, III et IV présentent les dégagements de chaleur. Dans l'étape II, le ciment se trouve dans un stade de 'dormance' : il a alors des propriétés presque 'plastiques', et il s'agit de la période idéale pour en faire le transport vers sa destination de construction. Cette période peut durer entre 2 et 3 heures, et comme elle est limitée, elle est à la base des réglementations qui stipulent qu'un ciment ou béton mélangé doit arriver à destination et être coulé en dedans d'un délai spécifique. Par la suite, lors des périodes III et IV, le ciment commence à durcir. La période V est atteinte après 36 heures, et malgré l'absence de chaleur produite, le ciment continue de durcir et prendre un gain en force. Cette période s'étale sur plusieurs jours, allant jusqu'à un mois pour une atteinte de force maximale. Le tout est dépendant de l'eau encore disponible dans le mélange, qui est en voie de réagir avec les composés chimiques.

Une des difficultés dans la réaction chimique du ciment est de bien doser la quantité d'eau à ajouter au mélange. L'eau est nécessaire pour faire la réaction d'hydratation, mais il faut savoir que plus d'eau que nécessaire est généralement ajoutée pour faciliter la maniabilité du ciment. Celui-ci devient plus facile à couler si un plus grand volume d'eau y est présent. Cependant, le danger dans ce genre d'ajout est que la présence d'eau latente à la fin de la réaction d'hydratation risque de créer un ciment avec une haute porosité, et d'affecter les forces de compression de celui-ci. Il existe donc un équilibre entre un ciment dont les forces de compression sont élevées, mais que la maniabilité est faible, et l'inverse. Une haute porosité présente aussi un risque d'infiltration d'eau, d'expansion thermique, de craquage et donc, de diminution de durabilité [44].

Chapitre 3. Matériel et méthodes.

Les analyses sur le mortier ont été effectuées par Richard Gagné, ing., Ph.D et Olivier Bonneau, Ph.D du Centre de recherche sur les infrastructures en béton de l'Université de Sherbrooke.

3.1. Matières premières

3.1.1. Les boues primaires

Divers échantillonnages de boues primaires et secondaires ont été effectués dans le cadre du projet, dans le but d'observer la variabilité de celle-ci dans le temps, avant de poursuivre avec des ajouts dans des mélanges de ciment:

- Le 6 juillet 2022, une chaudière de 20 L de boue primaire en provenance de l'usine de papier de Cascades Tissu à Kingsey Falls (du clarificateur MP3 Saturn) a été réceptionnée. Des analyses de MES, d'indice d'égouttage, d'analyse des fibres par caméra optique et de cendres à 525°C ont été effectuées sur cet échantillon.
- Le 31 août 2022, une seconde chaudière de boue primaire de 20 L en provenance de Tissu Kingsey Falls a été réceptionnée. Les analyses ont débuté le 1^{er} septembre 2022. Elles ont consisté en l'analyse des MES, les cendres à 525°C, l'analyse des fibres par caméra optique, ainsi que l'indice d'égouttage.
- Le 27 janvier 2023, trois chaudières de 20 L ont été réceptionnées, en provenance du traitement des eaux de l'usine de Cascades à Kingsey Falls. Il s'agissait d'une chaudière de boue primaire, une de boue secondaire, et une d'un mélange de boue primaire et secondaire. Comme les deux chaudières contenant de la boue secondaire ont présenté des odeurs fortes et déplaisantes en dedans d'une semaine de la date d'échantillonnage (dû à une richesse bactérienne plus importante), elles ont été mises hors du projet et seul l'échantillon de boue primaire a été analysé. Les analyses ont débuté le 27 février 2023 et ont consisté en MES, cendres à 525°C, indice d'égouttage, spectre infra-rouge, analyse des fibres par caméra optique et microscope à balayage électronique.

- Une discussion le 20 avril 2023 a établi que les analyses les plus critiques quant à la caractérisation de la boue seraient les MES, les cendres à 525°C, l'analyse des fibres par caméra optique (fibertester), ainsi que par microscope à balayage électronique (MBE).
- Le 31 mai 2023, une chaudière de 20 L de boue primaire a été obtenue du traitement des eaux de Cascades à Kingsey Falls. Cet échantillonnage est celui qui a été retenu pour les ajouts de fibre dans les mélanges de ciment. Les MES, cendres à 525°C, fibertester et MBE ont été effectués. Le 26 juin, cet échantillon a été centrifugé dans le centrifuge Beckman Coulter Avanti J-E avec un rotor JA-17 de l'université du Québec à Trois-Rivières pour séparer les fibres en minimisant la perte des composantes. La fibre ainsi épaissie a été envoyée à l'Université de Sherbrooke pour faire les ajouts dans le mortier.

3.1.2. Le ciment

Le ciment utilisé est en provenance de Lafarge Cement à St-Constant, Québec. Il s'agit d'un ciment de Portland type GU (GU-P), produit au mois de février 2022 et dont la fiche technique se trouve à l'annexe 1. Le ciment est en provenance du silo STC : R5m Q1, 12 & 5 et a été analysé selon les normes CSA A3001.

3.1.3. Le superplastifiant

Le superplastifiant (39% de matière sèche et 61% d'eau) utilisé dans les mélanges de mortier est le Plastol 6400, produit par Euclid Chemical. Sa fiche descriptive se trouve à l'annexe 2. Il s'agit d'un superplastifiant à base de polycarboxylate qui aide à atteindre une réduction d'eau d'environ 45%. Il est analysé selon les normes/ spécifications ASTM C494, Types A et F, ASTM C1017, Type 1, AASHTO M194, ANSI/NSF 61 et approuvés par le ministère des Transports du Québec.

3.1.4. Le sable

Le sable utilisé est un sable sec de marque Bomix. La fiche technique se trouve à l'annexe 3. Il s'agit d'un sable de provenance des Produits Dubois à St-

Léonard, de couleur brune et de densité entre 1600 et 1650 kg/m³. La norme granulométrique est selon le tableau 6 :

Tableau 6. Norme granulométrique du sable Bomix utilisé dans les mélanges de mortier.

Tamis (mm)	% passant
2,5	100
1,25	85 - 95
0,630	70 - 86
0,315	50 - 65
0,160	15 - 25
0,080	0 - 3

3.2 Méthodes

3.2.1. Méthodes d'analyse des boues

Toutes les analyses sur les boues ont été effectuées en duplicata.

- **Matières en suspension**

L'analyse des matières en suspension a été faite selon la méthode standard ISO 11923 : 1997. Cette méthode consiste à filtrer sur un papier filtre en fibre de verre un volume connu et pesé d'une solution contenant des solides. Des filtres Whatman (Cytiva) 934-AH de 90mm de diamètre ont été utilisés. Cette méthode consiste à peser un volume de liquide contenant des solides de façon précise, avant de filtrer celui-ci et de faire ensuite sécher le tout pour peser le résidu sec. Dans le cas d'une solution dont la consistance est supérieure à 1%, il est nécessaire de procéder avec une dilution pour tous les réplicas, de façon à diminuer le risque d'erreur.

- **Indice d'égouttage**

L'indice d'égouttage a été mesuré selon la méthode TAPPI/ANSI T 227 en utilisant un appareil 'Canadian Standard Freeness Tester' produit par Robert Mitchell Inc. Le principe de l'égouttage prend en considération la rétention d'eau causée par la fibre. Il faut précisément peser 1000 g d'une solution à 0.3% de consistance, et la solution au moment de l'analyse devrait être à 20°C. La température de la solution doit être prise au moment de l'analyse, car celle-ci aura un effet sur la vitesse d'égouttage; il existe un tableau à même la méthode qui permet d'ajuster l'indice d'égouttage obtenu en fonction de la température, ainsi que de la consistance.

Celle-ci est ensuite agitée pour suspendre les solides contenus à l'intérieur, avant d'être versée dans le réceptacle de l'appareil, qui relâche par la suite le volume total en un seul coup. Celui-ci s'écoulera à une vitesse plus ou moins grande, dépendant de la capacité à la fibre contenue de retenir l'eau. L'indice d'égouttage se mesure en mL, et plus cet indice est bas, plus la fibre tend à retenir l'eau.

L'importance de cette analyse se reflète, dans le domaine des pâtes et papiers, à déterminer la vitesse à laquelle un type de fibre, raffinée ou non,

pourra égoutter sur la toile lors de la formation d'une feuille de papier. Un indice trop élevé signifie que la fibre ne sera pas suffisamment libre d'eau à son arrivée dans les presses, et ne sera pas formée correctement.

- **Cendres à 525°C**

L'analyse des cendres à 525°C a été effectuée selon la méthode TAPPI T 211 om-16 en utilisant des filtres en fibre de verre Whatman (Cytiva) 934-AH de 90mm de diamètre pour récolter le solide nécessaire pour l'analyse. Un four Thermolyne programmé avec une rampe à 2°C/min à partir 105°C a été utilisé. Le filtre en fibre de verre contenant l'échantillon est placé dans un creuset couvert, et la lente progression de la rampe permet une combustion sans flamme, donc une perte de matière négligeable. L'échantillon est gardé dans le four jusqu'à combustion complète, soit 8 heures à 525°C, avant que la rampe de dégression débute. L'échantillon est retiré une fois la température du four revenue à 105°C, avant d'être refroidie et peser à quatre chiffres après la virgule.

- **Analyse optique des fibres (Fibertester)**

L'analyse des fibres par caméra optique a été effectuée selon la méthode interne Cascades ADMI-10.1-039B en utilisant un appareil L&W Fiber Tester Plus+. L'appareil utilise une caméra optique à haute définition avec détection à haute vitesse pour passer une solution de fibre au travers d'une cellule de verre pour obtenir les propriétés physiques de la fibre telles que la longueur de fibre, la largeur et le ratio de fibrillation.

Les échantillons n'ont pas besoin d'être à une consistance ou à une masse spécifique, car l'appareil passera la totalité de l'échantillon à injecter et fera un ratio en pourcentage des mesures qui ont été prises. L'échantillon doit être suffisamment dilué pour ne pas obstruer le système d'injection, donc d'une façon estimée, la solution préparée doit contenir peu de matière solide par volume d'eau.

- **Spectroscopie Infrarouge**

L'analyse par spectroscopie infrarouge a été effectuée en suivant la méthode interne Cascades ADMI-10.1-222 sur l'appareil Cary 600 series STIR Spectrometer d'Agilent Technologies.

- **Microscope à balayage électronique**

L'analyse par microscope à balayage électronique a été effectuée en suivant la méthode interne Cascades ADMI-10.1-222 sur l'appareil Axia de Thermoscientific. Les échantillons analysés ont été carbonisés à 525°C selon la méthode d'analyse sur les cendres à 525°C (TAPPI T 211 om-16).

3.2.2 Méthodes d'analyse des cylindres de ciment

- **Propriété à l'état frais des mortiers**

L'étalement de cette analyse est mesuré selon la norme ASTM C1437 [49]. Cette méthode d'essai est destinée à être utilisée pour déterminer le débit des mortiers de ciment hydraulique et des mortiers contenant des matériaux cimentaires autres que des ciments hydrauliques. Les mesures se font à l'aide d'un corps d'épreuve tronconique de diamètre inférieur 100 mm soumis à 25 coups à la table à chocs. L'étalement mesuré correspond à la différence entre le diamètre final et le diamètre initial du corps d'épreuve. Les résultats obtenus se trouvent dans le chapitre 3.

- **Masse volumique des mélanges**

La masse volumique a été mesurée par pesée dans un cylindre calibré contenant 400 ml de mortier, mis en place en 3 couches successives, pilonnées à chaque étape. Les mesures absolues et relatives sont par rapport au mélange 0.

- **Résistance à la compression des mortiers**

La résistance à la compression est mesurée sur des cubes selon la norme ASTM C109 avec l'aide d'un corps d'épreuve cubique d'arête 50.8 mm (2 pouces). Le moule est rempli en deux couches, avec un pilonnage de chaque couche avec 32 coups de butoirs. Les moules demeurent à température pièce (22.3°C ± 4°C) jusqu'au démoulage, et sont recouverts d'un polyéthylène pour

éviter que le mortier sèche. Après 24 heures, les cubes sont démoulés et mis en cure selon la norme ASTM C511 (chambre humide avec humidité relative supérieure à 95%, température de $22.3^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$). Les cubes sont sortis de la chambre juste avant l'analyse des compressions.

3.2.3 Fabrication des cubes de ciment

Pour respecter la méthodologie standardisée dans le domaine de formulation de cubes de béton pour analyse, l'Université de Sherbrooke a été intégrée dans le projet avec le mandat de formuler et analyser les différents mélanges de ciment et de boue primaire. Le professeur Richard Gagné (ing., Ph. D), ainsi que le professionnel de recherche Olivier Bonneau (Ph. D), ont eu la charge du projet. Leur mandat était de caractériser 5 mortiers incorporant différentes quantités de boue primaire à 5.6% de masse en fibres.

Les 5 mortiers possédaient un rapport d'eau sur ciment de 0.45. Le mélange de référence (sans boue ajoutée) contenait 585 kg/m^3 de ciment et 263.5 kg/m^3 d'eau pure du robinet. Le principe de l'incorporation de la boue avec un mélange de 94,1% d'eau et de 5,9% de fibres (boue primaire) était de considérer que la somme de fibre et ciment soit 585 kg/m^3 , alors que la somme d'eau du robinet et d'eau contenue dans la boue est de $263,5 \text{ kg/m}^3$. Le tableau 7, détaillant chacune des conditions analysées, se trouve :

Tableau 7. Formulation des mortiers tels que préparés par l'UdeS

Mélange		Mél. 0	Mél. 1/8	Mél. 1/4	Mél. 1/2	Mél. 1/1
Boue humide*	Masse absolue (kg/m^3)	0	35	70	140	280
	Fraction par rapport au max. (%)	0	12,5	25	50	100
Particules fines (kg/m^3)	Fibre	0	2,06	4,13	8,25	16,52
	Ciment*	585	583	581	577	569
	Total part. fines	585	585	585	585	585
Eau (kg/m^3)	Eau provenant de la boue	0	32,9	65,9	131,8	263,5
	Eau du robinet*	263,5	230,6	197,6	131,7	0
	Total eau (boue+robinet)	263,5	263,5	263,5	263,5	263,5
Sable* (kg/m^3)		1 493	1 493	1 493	1 493	1 493
Superplastifiant* (kg/m^3)		6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Masse vol. du mélange (kg/m^3)		2 348	2 348	2 348	2 348	2 348

* constituants pesés pour réaliser la gâchée

Ainsi, le mélange part pour part (Mél. 1/1), qui contient un maximum de boue, n'incorpore aucune eau du robinet. Le calcul est fait en considérant que l'eau du mélange total (280 kg/m^3) est répartie avec $263,5 \text{ kg/m}^3$ d'eau et $16,5 \text{ kg/m}^3$ de fibres. De cette façon les mélanges $1/8$, $1/4$ et $1/2$ correspondent à la quantité maximale de boue divisée par 8, 4 et 2, respectivement. Le superplastifiant mentionné ici haut est un dispersant organique permettant une meilleure dispersion des grains de ciment, et dont la quantité demeure inchangée selon le mélange.

Chapitre 4. Résultats et discussion.

4.1. Caractérisation de la boue

4.1.1 M.E.S., cendres et indice d'égouttage

Ici-bas se trouvent les résultats obtenus pour les analyses de M.E.S., cendres à 525°C et l'indice d'égouttage des 4 échantillons de boue prise au courant de ce projet (tableau 8). L'indice d'égouttage n'a pas été mesurée pour le dernier échantillon obtenu, soit TDE Primaire 2, qui est l'échantillon utilisé dans la construction des blocs de mortier. À ce stade-là, le besoin de connaître l'indice d'égouttage a été déterminé comme étant à faible valeur ajoutée.

Tableau 8. Résultats des analyses physico-chimiques sur les diverses boues échantillonnées

Identification de l'échantillon	Date échantillonnage	Consistance (%p/p)	Écart consistance (%)	M.E.S. (%p/p)	Écart sur M.E.S. (%)	Cendres 525°C (%)	Écart cendres 525°C (%)	Indice d'égouttage (mL)	Écart indice égouttage (%)
Saturn TKF	2022-07-06			3.61	2.48	60.2	0.21	505	0.99
TKF	2022-08-31	3.95	1.55	3.99	1.17	49.3	0.19	146	2.66
TDE Primaire 1	2023-01-27	1.48	0.56	1.39	0.75	5.93	1.62	330	2.15
TDE Primaire 2	2023-05-31	1.64	2.96	1.63	0.78	16.7	0.07		

Il est possible d'observer un très haut taux de cendres dans les deux échantillons prélevés chez Tissu Kingsey Falls, le 6 juillet et 31 août 2022. Comme il s'agit d'une usine qui traite beaucoup de matériel imprimé, il n'est pas inhabituel de voir ce genre de taux dans ce qui a été prélevé. Comme les deux échantillons en provenance du traitement des eaux (le 27 janvier et 31 mai 2023) découlent d'un mélange qui est en provenance de la totalité des usines de Cascades à Kingsey Falls, il est aussi normal d'y voir un taux nettement inférieur, car les cendres proviennent en grande partie du matériel recyclé imprimé. De plus, il est possible d'observer une variabilité entre les deux taux prélevés. Effectivement, avec des analyses plus régulières, il deviendrait rapidement évident que le mélange échantillonné varie beaucoup dans le temps, car il est dépendant de la production des usines liées au système. Comme les productions de celles-ci

varient grandement d'une journée à l'autre (et souvent au sein d'une même journée), les rejets produits et ensuite traités au traitement des eaux sont eux aussi variables.

L'indice d'égouttage est fortement lié au type de fibres qui se trouvent dans celui-ci. Les fibres éclatées ou fibrillées auront tendance à retenir l'eau plus facilement que des fibres courtes, coupées et fermées. Les contaminants minéraux et chimiques peuvent eux aussi avoir un impact sur l'égouttage s'ils contribuent à bloquer la toile d'écoulement de l'instrument utilisé, ainsi que le feutre sur lequel se forme la feuille de papier sur une machine. Dans le cas de la présente analyse, il est possible d'observer une grande variabilité dans les quelques données obtenues, et il est difficile de se prononcer sur celles-ci sans une liste plus exhaustive d'échantillons pris sur une plus grande période.

4.1.2. Analyse optique des fibres

Dans le tableau 9 se trouvent les résultats obtenus par l'instrument optique Fiber Tester, qui défile un échantillon de pâte devant une caméra optique à haute vitesse pour en déterminer la longueur des fibres présentes :

Tableau 9. Résultats de l'analyse optique des boues par FiberTester.

Identification de l'échantillon	Date d'échantillonnage	Longueur moyenne (mm)	Écart longueur (%)	Fibres fines (%)	Longues fibres (%)	Largeur (um)
Saturn TKF	2022-07-06	0.77	0.52	61.8	2.2	32.2
TKF	2022-08-31	0.46	6.54	87.1	2.0	22.7
TDE Primaire 1	2023-01-27	0.97	3.42	45.6	7.7	24.7
TDE Primaire 2	2023-05-31	1.06	2.26	77.5	11.1	25.9

Le processus de transformation de la fibre dans l'industrie des pâtes et papiers affecte la longueur et le diamètre de celle-ci. Un raffinage excessif, et le recyclage répété de la fibre détruisent progressivement celle-ci, coupant la fibre au lieu de la fibriller, et ceci produit des rejets. L'analyse optique permet d'établir le pourcentage de différentes longueurs de fibres se trouvant dans un échantillon.

Pour un échantillon servant à la production de papier, un haut taux de fibres fines est à proscrire; celle-ci aura un effet négatif sur les propriétés physiques recherchées, telles la douceur et la force. En revanche, dans un échantillon de rejets, comme ceux analysés ici haut, il est tout à fait attendu d'avoir un haut taux de fibres fines, un faible taux de fibres longues, et une longueur moyenne inférieure à 2 mm. Dans tous les cas analysés, la tendance se maintient, et comme il a été noté précédemment, la variabilité des résultats d'une analyse à l'autre est à attendre, dû à la variabilité de la production et de la matière première utilisée et selon le point d'échantillonnage. La boue prélevée directement à une usine de papier tissu aura tendance à avoir plus de fibres courtes en raison des processus de raffinage de celle-ci.

4.1.3. Spectroscopie infrarouge

Une analyse par spectroscopie infrarouge a été effectuée sur le premier échantillon prélevé du traitement des eaux (TDE1 Primaire), le 27 janvier 2023 pour le comparer au spectre de la cellulose. La figure 8 démontre cette analyse avec, en bleu, le signal de l'échantillon, et en rouge, le signal de la cellulose :

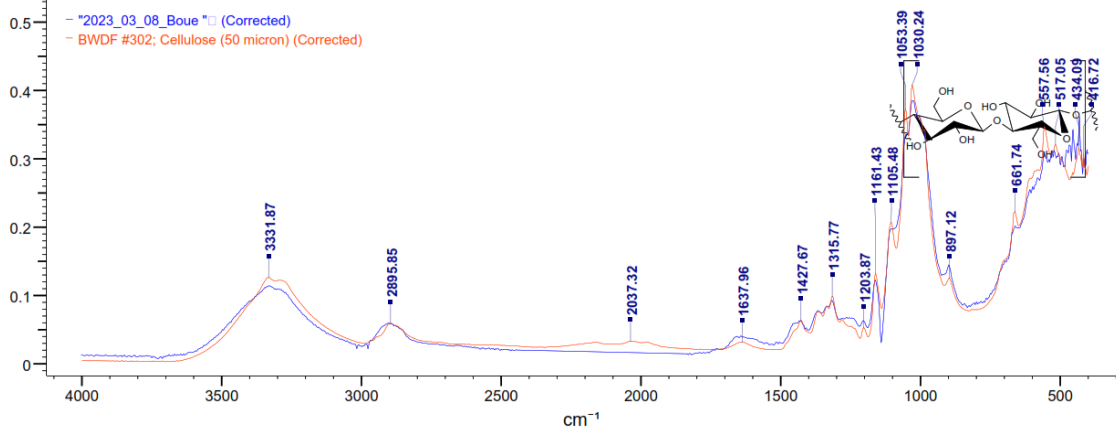


Figure 8. Spectre infrarouge de la boue primaire du traitement des eaux, prélevée le 27 janvier 2023.

L'analyse permet de valider la présence de cellulose dans le mélange, ce qui concorde avec le fonctionnement habituel du système de rejets d'une usine de pâtes et papiers : la présence de fibre est à prévoir, d'autant que celle-ci est quand même inutilisable dans le processus de pâtes et papiers en raison du dommage

subit à a fibre lors de son recyclage et de son raffinage. Comme cette analyse apporte peu d'autre information et peu de variabilité dans le temps, elle a été omise pour l'échantillon subséquent.

4.1.4. Analyse de microscopie par balayage électronique

La microscopie par balayage électronique permet un grossissement au-delà de 1 000 000 fois d'une image. De plus, elle permet de faire une analyse élémentaire d'un échantillon, donc de déterminer le pourcentage des éléments se trouvant à sa surface, comme indiqué dans le tableau 10 :

Tableau 10. Résultats de l'analyse élémentaire par microscope à balayage électronique de l'échantillon TDE2.

Élément	Pourcentage atomique (%)	Erreur atomique (%)	Pourcentage par poids (%)	Erreur sur poids (%)	Décompte net
C	13.4	0.1	8.4	0.1	98 421
O	58.5	0.3	48.9	0.2	1 077 392
Na	2.0	0.0	2.4	0.0	108 217
Mg	2.4	0.0	3.1	0.0	190 996
Al	6.2	0.0	8.7	0.0	668 033
Si	13.4	0.0	19.6	0.1	1 573 227
S	0.6	0.0	1.0	0.0	79 264
Ca	2.7	0.0	5.6	0.0	340 284
Ti	0.3	0.0	0.8	0.0	53 408
Fe	0.5	0.0	1.4	0.0	67 613

L'analyse s'effectue sous vide pour éliminer au maximum la contamination élémentaire extérieure de l'échantillon. Ainsi, l'oxygène et le carbone correspondent essentiellement à la cellulose qui compose la majorité de l'échantillon, avec le haut pourcentage d'oxygène pouvant être associé à des composés d'oxyde de titane et de calcium, soit deux agents utilisés pour augmenter la blancheur du papier. Il serait possible de s'attendre à un plus haut taux de titane et de calcium dans ce cas, cependant il faut considérer que la boue analysée est composée d'un mélange en provenance de plusieurs usines, dont la

majorité ne traite pas de papier blanc. Les autres éléments trouvés en majorité, comme l'aluminium, le calcium, le magnésium et le sodium sont donc en provenance des contaminants rejetés du procédé papetier. La silice est principalement en provenance de contaminants terreux du procédé, mais aussi de l'ajout d'un agent chimique de silice pour accélérer le drainage de la pâte au moment de sa formation sur la toile. Comme le ratio oxygène-carbone est de 4.36 pour la boue, alors qu'il devrait être de 0.83 pour la cellulose, il est possible de conclure que les fibres sont très contaminées à la surface par les pigments.

Ici-bas se trouve la figure 9, en lien avec l'analyse élémentaire, qui offre une vue imagée des divers éléments trouvés en surface de l'échantillon :

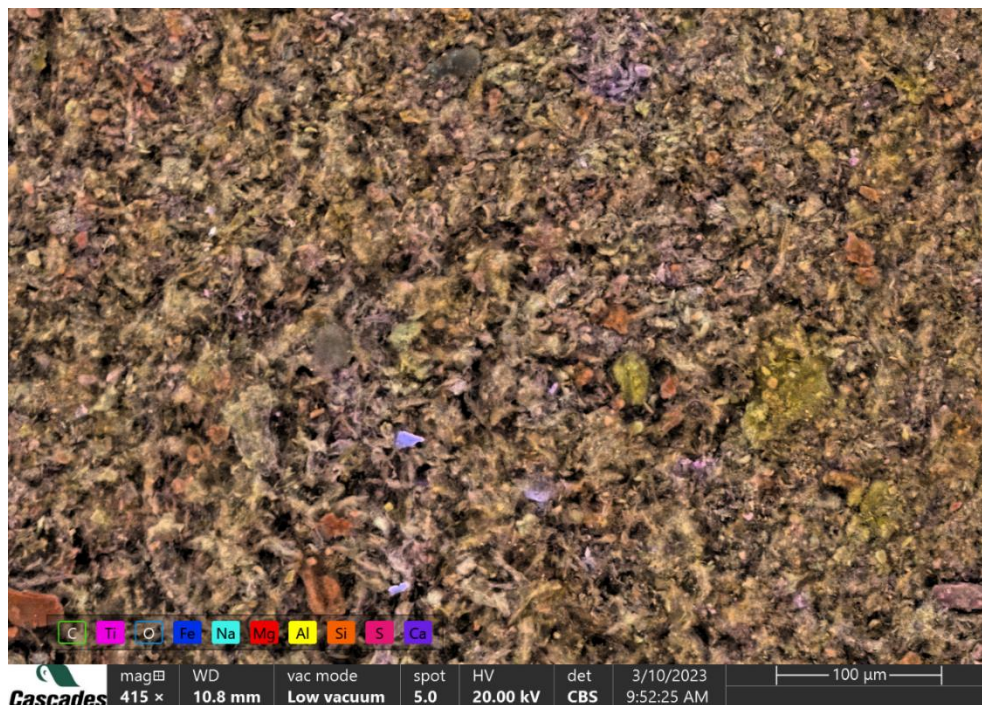


Figure 9. Analyse élémentaire par MBE de la boue primaire TD2.

Sur cette figure, il est possible de valider les informations trouvées au tableau 10 en lien avec l'analyse par MBE. Le carbone et l'oxygène sont omis pour faciliter la vue des autres éléments, permettant de confirmer la forte présence de silice, d'aluminium, de magnésium et de calcium. La silice et le calcium sont deux éléments se trouvant à la base dans le mélange de ciment et, en forte concentration, pourraient avoir un effet sur la réaction chimique d'hydratation [52].

4.2 Caractérisation des mélanges de mortier

4.2.1 Propriétés à l'état frais des mortiers

À la suite de l'étalement selon la norme ASTM C1437, le comportement des différents mortiers est décrit dans le tableau 11:

Tableau 11. Propriétés à l'état frais des mortiers avec et sans ajout de fibres

Mélange		Mél. 0	Mél. 1/8	Mél. 1/4	Mél. 1/2	Mél. 1/1
Température (°C)		26	25,8	25,7	25	26
Étalement	Mesure (mm)	195	130	95	50	0
	Relatif (%)	100	67	49	27	0
Masse volumique	Mesure (kg/m ³)	2 211	2 164	2 138	2 166	2 162
	Relative (%)	100	97,9	96,7	98,0	97,8

Il devient rapidement évident que tout ajout de fibres dans le mélange diminue significativement l'étalement. Ceci est d'autant plus apparent dans les deux figures suivantes (10 et 11), soit un graphique de la perte d'étalement relatif en fonction de l'ajout de fibres, et des images démontrant la différence dans les mélanges selon l'ajout de fibres :

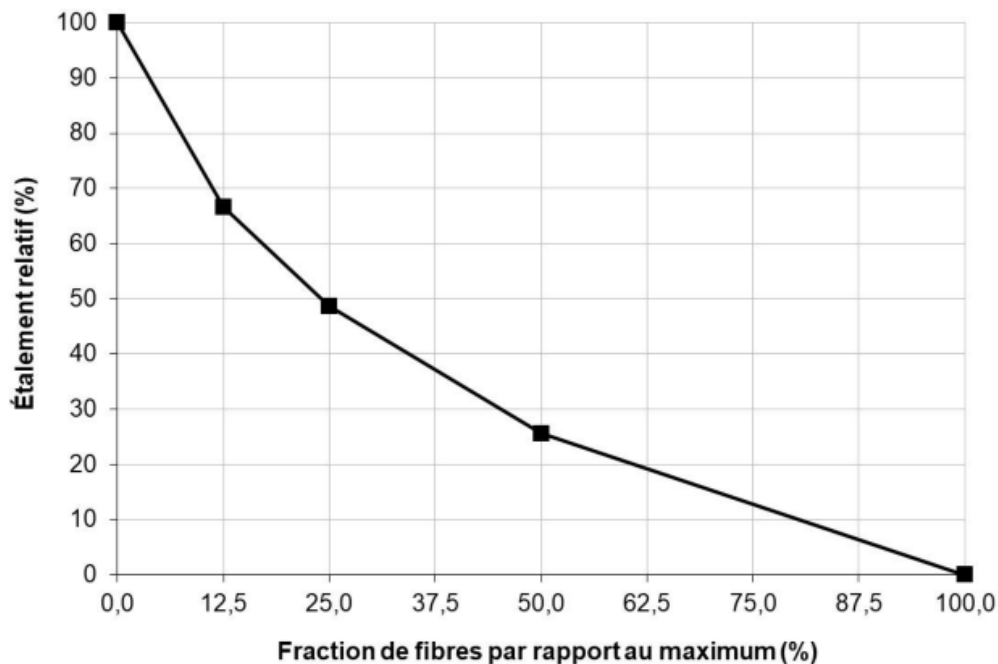


Figure 10. Étalement relatif du mortier en fonction de la fraction des fibres

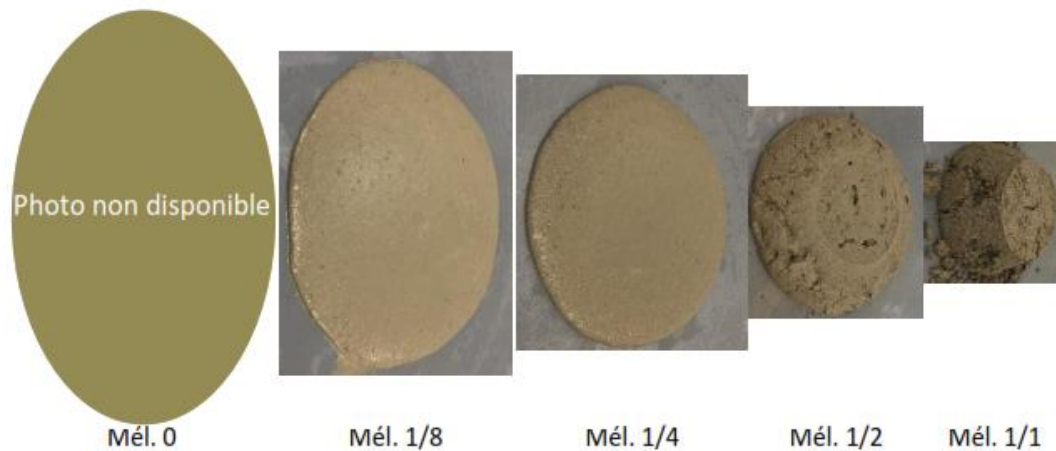


Figure 11. Photographies des spécimens après étalement (approximativement à l'échelle)

Selon ces résultats, il est possible de distinguer deux familles apparentes dans les mélanges formés, soit la famille 1, composée des mélanges 0, 1/8 et 1/4, ainsi que la famille 2, composée des mélanges 1/2 et 1/1. La famille 1 se caractérise avec une consistance plus homogène, tel un mortier standard (semblable au mélange de mortier 0). La famille 2 se présente comme ayant une consistance différente d'un mortier standard principalement en raison de la perturbation de l'empilement granulaire du mélange, causé par le fort volume de fibres. Le graphique de l'étalement relatif ici haut démontre très bien cette observation : le mélange 1/1 a subi 0% d'étalement, concordant avec son apparence visuelle à la figure suivante. Il ne se comporte aucunement comme un mortier standard.

L'ajout de fibres dans le mélange aurait dû se traduire par une masse volumique inchangée, alors que l'inverse a pu être observé sur la figure 12 :

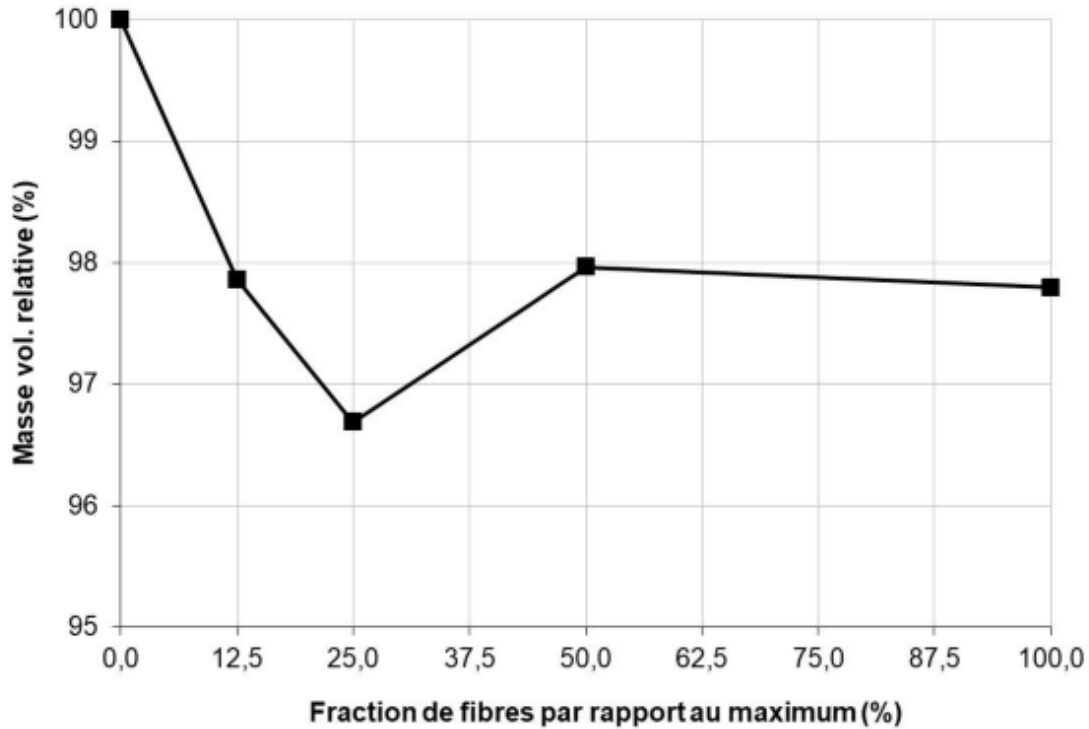


Figure 12. Masse volumique relative du mortier en fonction de l'ajout de la fraction de fibres

Cette variation peut être expliquée que la compacité du mélange diminue lors de l'introduction de fibres en créant des défauts de compactage. Dans le cas de la famille 1 identifiée ci-haut, la perte de masse volumique augmente avec la quantité de fibres ajoutées, alors que pour la famille 2, la masse volumique augmente légèrement par rapport à la famille 1. Ceci peut s'expliquer par le pilonnage du mortier, qui se trouve à être plus efficace pour la consistance du matériau plus raide.

4.2.2 Résistance à la compression des mortiers

Les mesures obtenues pour la résistance à la compression des mélanges de mortiers se trouvent ici-bas, en tableau (12) et en graphique (figure 13) :

Tableau 12. Résistances à la compression des mortiers au jour 1 et au jour 28

		Résistance à la compression				
		Mél. 0	Mél. 1/8	Mél. 1/4	Mél. 1/2	Mél. 1/1
Mesure à 1 jour (MPa)	Cube 1	27,8	24,2	22,6	17,5	10,7
	Cube 2	27,9	24,5	22,7	18,5	10,9
	Cube 3	-*	24,8	21,4	18,4	11,8
	Moyenne	27,9	24,5	22,2	18,1	11,1
	Coeff. de variation (%)	0,2	1,0	4,2	0,3	5,7
Valeur relative à 1 jour (%)		100,0	87,8	79,6	65,1	39,9
Mesure à 28 jours (MPa)	Cube 1	59,6	58,0	52,5	41,4	32,9
	Cube 2	61,4	59,2	53,9	42,9	33,1
	Cube 3	60,7	56,6	55,0	46,3	31,1
	Moyenne	60,6	57,9	53,8	43,5	32,4
	Coeff. de variation (%)	0,8	3,3	1,4	5,5	4,3
Valeur relative à 28 jours (%)		100,0	95,7	88,8	71,8	53,5

* erreur de manipulation (mauvaise échelle sur la presse)

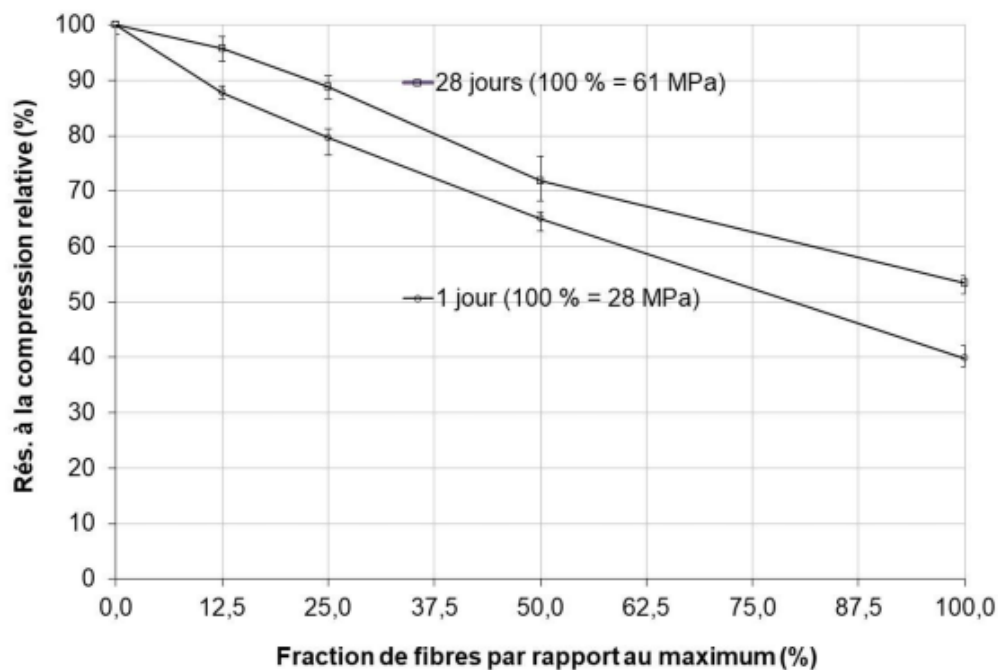


Figure 13. Résistance à la compression du mortier, jour 1 et jour 28, en fonction de la fraction de fibres

Ici, il est possible d'observer une baisse importante de la résistance à la compression (60,1 % en valeur relative) mesurée à 1 jour avec le mélange 1/1. Il est à noter que ce comportement est moins marqué pour les mesures prises à 28

jours, atteignant 46.5 % de résistance relative pour le même mélange. Ce phénomène pourrait s'expliquer par deux effets causés par la fibre dans la boue :

- Il y aurait une perte physique des résistances à 1 et 28 jours reliée à une perte de compacité du mortier et;
- Il y aurait une perte chimique additionnelle à 1 jour due à un retard de durcissement du ciment par cause de présence de matière organique. Il s'agit d'un effet qui s'estompe à long terme.

Ainsi, le phénomène observé dans d'autres analyses connexes qui décrit une reprise de force de compression après un long curage a potentiellement lieu d'être dans les observations des présentes analyses.

De plus, il est à noter que la perte de résistance à 28 jours est faible pour la famille 1 : seulement 4.3% pour le mélange 1/8, et de 11.2 % pour mélange à 25% de fibres (1/4). Ceci indique que la famille 1 conserve un comportement similaire à celui du mortier de référence à long terme.

4.3. Discussion sur les ajouts de boue dans le mortier

Le tableau 9, qui démontre les changements de l'étalement du mortier avec l'ajout de boue, démontre qu'il y a une diminution de 33% de la capacité d'étalement entre le mélange sans boue, et le mélange d'une part d'eau en provenance de la boue, pour 8 parts d'eau du robinet. L'étalement est une propriété importante dans le domaine cimentier : elle permet la distribution uniforme du mortier. Ainsi, toute diminution importante risque d'être nuisible à l'utilisation appropriée du mortier, et risque de déboucher sur des problèmes structuraux. Cependant, en se fiant aux images de la figure 13, il devient apparent que le mélange à 1/8 et le mélange à 1/4 se comportent visuellement de la même manière et de façon similaire à un mélange sans ajout de boue. Ceci n'est plus le cas pour les mélanges à 1/2, et le mélange à 1/1, dont l'étalement est fortement affecté et ne permet plus une distribution uniforme du mortier. Ceci permet de déterminer que le potentiel d'utilisation de la boue dans le mortier se limite déjà à une présence inférieure à 1/4 du mélange.

Le tableau 10 démontre l'analyse élémentaire effectuée sur un échantillon et il est intéressant de s'attarder sur la présence de 13.4% de silice dans la boue. La provenance de cet élément est expliquée précédemment, et certaines études démontrent que l'ajout de fumée de silice dans des mélanges de mortier permet d'augmenter la résistance à la compression de celui-ci [52]. À ce stade-ci, et dans les limites de ce projet, il est seulement possible de spéculer sur l'effet réel de la présence de silice dans la boue et son effet sur la résistance à la compression du mortier, mais dans un cadre d'une éventuelle recherche plus approfondie, cet aspect devrait être davantage exploré.

Le tableau 12 détaille la variation à la résistance à la compression des différents mélanges de mortier, et ce, après 1 jour, et après 28 jours. Comme le ciment possède un temps de curage de 28 jours pour atteindre sa force maximale, temps durant lequel des réactions chimiques latentes doivent se produire, il est nécessaire de faire l'analyse de la résistance à deux reprises. Le mélange sans ajout de boue est considéré dans cette étude comme le maximum de la force à atteindre. Ainsi, après 1 jour de curage, le mélange à 1/8 présente une diminution

de la résistance à la compression de 12.2%, le mélange à 1/4 de 20.4%, le mélange 1/2 de 34.9%, et le mélange de 1/1 de 60.1%. Initialement, il faut donc considérer que même au mélange minimum de boue, l'effet sur la perte de résistance à la compression peut être trop important pour permettre au mortier ainsi mélangé d'être utilisé dans la construction. Cependant, l'impact de cette diminution est amoindri lors de l'analyse effectuée à 28 jours : une perte de seulement 4.3% est notée pour le mélange de 1/8, de 11.2% pour le mélange de 1/4, de 28.2% pour le mélange de 1/2, et de 46.5% pour le mélange de 1/1. Alors que les mélanges de 1/2 et de 1/1 demeurent trop fortement affectés pour être pris en considération (phénomène qui concorde avec l'observation visuelle de l'étalement décrite ici haut), le mélange à 1/8 présente assez peu de différence pour être considéré comme utilisable. Effectivement, au Canada, la norme stipule qu'un mortier de type S doit présenter au minimum 8.5 MPa lors de la résistance à la compression à 28 jours s'il a été formé en chantier, et 12.5 MPa s'il a été formé en laboratoire [50]. Or, l'analyse effectuée sur les mélanges de mortiers considère que le mélange 0 résiste à 61 MPa à 28 jours, donc que le mélange 1/8 résiste à 58 MPa à 28 jours et le mélange 1/4 à 54 MPa à 28 jours. Ainsi, les deux mélanges respectent le minimum pour un béton léger. Il est à mentionner que selon la figure 13, la compression de la référence à 1 jour s'exprime à 28 MPa, comparativement à 61 MPa à 28 jours. Dans les deux cas, les mélanges 1/8 et 1/4 respectent la norme mentionnée précédemment. Les mélanges à 1/2 et 1/1 ne sont pas pris en considération ici en raison de leur forte perte de capacité d'étalement qui, comme mentionné précédemment, en ferait de piètres candidats pour une utilisation en construction.

Selon les observations, il semble que la présence de fibres fines perturbe les propriétés des mortiers en affectant la compacité des mélanges et dont les effets se manifestent sur la maniabilité, ainsi que les résistances à la compression à court et long terme. Lors des premiers jours de curage, la présence de matière organique entraîne un ralentissement du durcissement de ciment, mais l'effet s'estompe dans le temps. De cette manière, les pertes de maniabilité et de compression sont moindres pour les mélanges inférieurs à 25 % de fibres

relatives. La présence d'un superplastifiant pour les mélanges plus riches en fibres pourrait aider à pallier ce comportement de perte, mais que le coût du mortier s'en trouverait augmenter. Si ce genre de mortier venait à être utilisé dans des applications de construction, il serait nécessaire de prendre en considération l'effet de la fibre sur la prolongation du temps de curage, et son effet sur la diminution de la résistance à la compression. Il n'est pas rare de voir au Québec que les coffrages de ciment se trouvent démontés 24 heures après la fin de placement du béton, et que les constructions résidentielles s'en suivent bien avant la période de 28 jours de curage recommandée. Pour le moment, l'effet ne semble pas suffisamment problématique pour demander un changement au mode opératoire, mais avec l'utilisation d'un ciment nécessitant un temps de curage plus rigide, il pourrait être nécessaire d'insister sur un changement dans la façon de faire.

Chapitre 5. Conclusions

Le premier objectif de cette étude était de caractériser physiquement et chimiquement la boue primaire produite par Cascades dans la municipalité de Kingsey Falls. L'analyse de deux échantillons de boue primaire a permis de voir une ressemblance sur la quantité des matières en suspension du mélange, mais une variabilité sur le pourcentage de cendres s'y trouvant, ainsi que sur la longueur des fibres du mélange. Effectivement, comme la production de boue est fortement dépendante de la production même des usines, qui elle varie grandement dans le temps, il est difficile d'observer une stabilité dans la qualité et la quantité de fibre. Considérant ceci, l'analyse chimique a été effectuée uniquement sur l'échantillon servant à formuler le mélange pour la suite du projet. Cette analyse a permis de confirmer la présence de carbone associé à la cellulose, mais aussi d'éléments tels l'oxygène, le silicate, le magnésium, le calcium et le sodium.

Dans un second lieu, il y a eu question de faire l'ajout de la boue dans un mélange de mortier, et d'en évaluer l'effet sur les propriétés physiques. En utilisant une boue épaissie à 5.6% (p/p), l'Université de Sherbrooke a procédé à la construction de cubes de mortier. Une des propriétés physiques critiques du mortier est son étalement, qui permet une distribution uniforme de celui-ci lors de la construction; il a été noté que la perte d'étalement était négligeable pour le mélange de mortier à 1/8, notable pour le mélange à 1/4, et beaucoup trop importante pour les mélanges à 1/2 et 1/1. Ainsi, un mélange supérieur à 1/8 de boue primaire serait difficile à manipuler dans un contexte de construction.

Le troisième objectif était de comparer les propriétés physiques des divers mélanges de mortier. En plus de l'étalement mentionné ici haut, la force de résistance à la compression à 1 jour de curage, et à 28 jours de curage fut effectuée. De façon générale, la résistance était beaucoup plus impactée au premier jour de curage. Cet effet s'allégeait au 28e jour, passant d'une perte de 12.2% au premier jour, à 4.3% au 28e jour pour le mélange 1/8, comparativement au mortier fabriqué sans ajout de boue primaire. Il est important de noter que tous les mélanges respectent la norme canadienne du mortier type S, qui doit atteindre

une résistance à la compression de 8.5 MPa au minimum à 28 jours, dans le cas d'un mortier formé en chantier, et 12.5 MPa pour un mortier de laboratoire. Ainsi le mélange 1/8 demeure acceptée selon cette norme et bien que les autres mélanges seraient aussi règlementaires, la forte diminution de leur capacité d'étalement, mentionnée ici haut, en fait de piètres candidats pour des applications réelles.

Finalement, il était question de déterminer le pourcentage de boue primaire pouvant être ajoutée à un mélange de mortier sans en affecter de façon significative les caractéristiques et capacités physiques. Selon les analyses effectuées, le mélange 1/8 présente des applications potentielles comme ajout dans un mortier. Il s'agit d'un mélange qui contient seulement 2.06 kg/m^3 de fibres, soit une masse absolue de 35 kg/m^3 avec une boue de 5.6% de consistance. Celui-ci démontre un étalement semblable à celui d'un mortier sans boue, et sa perte de résistance à la compression est négligeable lors de la comparaison avec le mortier sans boue. Ainsi, il s'agit d'un candidat potentiel pour des applications réelles.

Pour donner suite à ce projet, une des avenues à explorer serait l'impact de la variation de la composition de la boue sur le mélange de mortier. Fixer le taux optimal de boue dans le mélange et procéder à plusieurs analyses de composition physique et chimique de la boue primaire à un intervalle régulier permettrait d'évaluer à quel point la variation impacte la force de compression du mortier. Ayant réponse à cette question, il serait possible de valider si une connaissance approfondie de la composition de la boue est nécessaire dans un projet désirant donner une seconde vie à la boue dans l'industrie du ciment. De plus, il est important de noter que la boue a été épaissie avant d'être ajoutée au mélange de mortier, pour permettre d'en mettre une plus grande quantité dans le volume de mortier standard à préparer dans la cadre du projet. Avec les conclusions discutées plus haut, comme un mélange réel ne dépassera pas les 2.06 kg/m^3 de fibre, il serait possible d'utiliser une boue n'ayant pas été épaissie. Dans ce genre de situation, l'aspect de transformation est optimisé : il n'est pas nécessaire de

sécher ou manipuler la boue autrement que de lors de la production habituelle. Cependant, il faut alors considérer l'aspect du transport : comme la boue sera riche en eau, et que la vaste majorité des transports s'effectuent avec un chargement en masse, il devient alors inefficace de transporter de l'eau, et l'impact de la diminution des GES est amoindri. Considérant ceci, il serait primordial d'explorer la possibilité d'utiliser une boue pressée à 50% de siccité. Des analyses ont déjà été effectuées sur l'ajout de fibre à bas taux d'humidité; celle-ci démontre que la présence de fibre sèche risque de former des poches d'air au travers des mélanges, et créer ainsi des points faibles qui risquent d'impacter la résistance à la compression [12]. Ainsi, le défi est de taille pour explorer une méthode qui permet de transporter un minimum d'eau, sans rendre la boue impossible à intégrer au mélange de mortier, ou de ciment.

Références

- [1] Bhasin, H. « Top 10 Cement brands in the world 2023 », 8 février 2023, <https://www.marketing91.com/top-10-cement-brands-in-the-world/#:~:text=The%20value%20of%20the%20current,billion%20by%20the%20year%202030.>
- [2] Baillargeon Matériaux, « Liste de prix 2020 de béton préparé », BMateriaux-14639-Liste-de-prix-2020_beton.pdf (pbaillargeon.com))
- [3] « Cement Statistics and Information », National Minerals Information Center, Cement (usgs.gov)
- [4] Worrell, E. et al.; *Annu. Rev. Energy Environ.*, **2001**, 26, 303.
- [5] Tiseo, Ian. « Global carbon dioxide emissions from cement manufacturing 1990-2021, by country », *Statista*, Novembre 2022, <https://www.statista.com/statistics/1091672/carbon-dioxide-emissions-global-cement-manufacturing/>
- [6] Lamb, W. F. et al.; *Environ. Res. Lett.*, **2021**, 16.7, 073005.
- [7] Moya, J. A.; Pavel, C. C.; « Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the pulp and paper industry », *JRC Science for Policy Report*, European Commission, 2018.
- [8] Auteur Inconnu, « A significant growth in packaging paper and board production volumes », *Statista Research Department*, décembre 2023, <https://www.statista.com/topics/1701/paper-industry/#topicOverview>
- [9] Faubert, P.; Barnabé, S.; Bouchard, S.; Côté, R.; Villeneuve, C.; *Resour., Conserv. Recycl.*, **2016**, 108, 107.
- [10] Auteur Inconnu, « Notre Plan de développement durable 2021-2025 en un coup d'œil. », *Cascades*, https://cascades.metro.net/indicators/notre_entreprise/nos_cibles/ind_nos_cibles

- [11] Golova, T.; Magerramova, I.; Andreeva, N.; *E3S Web Conf.*, **2020**, *157*, 06036.
- [12] Malaiskiene, J.; Kizinievic, O.; Kizinievic, V.; Boris, R.; *Constr. Build. Mater.*, **2018**, *172*, 553.
- [13] Auteur Inconnu, « The History of Paper », *American Forest & Paper Association*, <https://www.afandpa.org/history-paper>
- [14] Aytac, A.; Korkmasz, M.; *Stud. Univ.*, **2022**, *32(2)*, 0007.
- [15] Auteur Inconnu, « Comparison of Softwood Pulp and Hardwood Pulp », *CNBM International*, 2018, <https://www.paperpulpingmachine.com/softwood-pulp-and-hardwood-pulp-comparison/>
- [16] Auteur Inconnu, « Wood: Softwood, Hardwood, Springwood, Autumn wood, Heartwood and Sapwood, Practice problems and FAQs », *Aakash*, <https://www.aakash.ac.in/important-concepts/biology/classification-of-wood#:~:text=problems%20and%20FAQs-,Wood%3A%20Softwood%2C%20Hardwood%2C%20Springwood%2C%20Autumn%20wood%2C%20Heartwood,and%20durability%20of%20the%20wood.>
- [17] Auteur Inconnu, « Chimie du bois: cellulose, hémicellulose et lignine », *WSL*, <https://totholz.wsl.ch/fr/bois-mort/decomposition-du-bois/chimie-du-bois/>
- [18] Helmenstine, A. M., « What Is Cellulose? Facts and Functions », *ThoughtCo.*, 2019, <https://www.thoughtco.com/what-is-cellulose-definition-4777807>
- [18] Auteur Inconnu, « Wood composition », *UNSW, Materials Science & Engineering*, <https://www.unsw.edu.au/science/our-schools/materials/engage-with-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/composites/wood/wood-composition>
- [19] Ghalia, M. A.; Dahman, Y., « Synthesis and utilization of natural fiber-reinforced poly (lactic acid) bionanocomposites », *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials*, 2017.

- [20] Scheller, H. V.; Ulvskoz, P.; *Annu. Rev. Plant Biol.*, **2010**, *61* :263.
- [21] Gerardin, P., « Les composés chimiques extractibles du bois », *Extra Forest*, <https://www.couleursbois.com/media/kunena/attachments/20302/ExtractiblesGerardin.pdf>
- [22] Fowler, A., « Stone Ground wood Pulp - Mechanical Pulp Production », 2022, *The Papermaking Bible*, <https://www.papermakingbible.co.uk/2017/04/stone-ground-wood-pulp.html>
- [23] Casey, J. P., « Pulp and Paper: Chemistry and Chemical Technology », Volume 1, 3ème édition, 1980.
- [24] Tran, H., Vakkilainen, E. K.; « The Kraft Chemical Recovery Process », 2007, *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>
- [25] Li, P. et al.; *Polymers*, **2023**, *15*(22), 4465.
- [26] Bose, S. K. et al.; *J. Wood Chem. Technol.*, **2009**, *29*(3), 214-226.
- [27] Martin, N.; Anglani, N.; Einstein, D.; et al.; « Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry », *Berkley National Laboratory*, Environmental Energy Technologies Division, 2020.
- [28] Scott, G. M.; Smith, A.; Abubakr, S.; *Proc. - TAPPI Int. Environ. Conf.*, 1995, 269.
- [29] Geng, X.; Zhang, S. Y.; Deng, J.; *Wood Fiber Sci.*, **2007**, *39*(2), 345-351.
- [30] Bouchard, M-P., « Cultiver avec des résidus de pâtes et papiers pour réduire les GES », *Radio-Canada*, 2019, <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1398926/boues-pates-papiers-gaz-effet-serre-agriculture-cultivateurs-recherche-kruger>
- [31] Wang, S.; Wen, Y.; Hammarstrom, H.; Jonsson, P. G.; Yang, W.; *Ren. Energy*, **2021**, *177*, 1282-1292.

[32] Auteur Inconnu, « What is the calorific value of wood? », *C. F. Nielson*, <https://cfnielsen.com/faq/calorific-values-for-different-raw-materials/#:~:text=The%20oven%2Ddry%20calorific%20value,18.5%20to%2019%20MJ%2FKg>.

[33] « Biométhanisation sur place », Recyc-Québec, gouvernement du Québec, <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/matieres-organiques/scenarios-gestion-entreprise/biomethanisation-sur-place>

[34] « Canadian Environmental Protection Act », 1999 (CEPA), gouvernement du Canada.

[35] « Recommandations Canadiennes pour la qualité de l'environnement », Le Conseil canadien des ministres de l'environnement, gouvernement du Canada, <https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>

[36] « Pulp and Paper Effluent Regulations », SOR/92-269, gouvernement du Canada, <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-92-269/FullText.html>

[37] « Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes », 2015, gouvernement du Québec, https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/guide-mrf.pdf

[38] T. G. M. van de Ven, F. J. Smit, R. R. van Klaveren, M. H. M. Roozendaal, G. J. Witkamp, "Characterization of primary paper mill sludges," *Environmental Pollution*, Volume 108 1–2, 2000, Pages 165-173.

[39] S. A. Hassan, M. A. Gad, A. R. El-Aassar, "Treatment and utilization of paper mill effluent sludge," *Environmental Science and Pollution Research*, Volume 24-9, 2017, Pages 8015-8033.

[40] C. F. Forster, "Pulp and Paper Industry," in *Industrial Wastewater Management, Handbook of Environmental Engineering*, Springer, 2014, Pages 569-592.

[41] De Azevodo, A. R. G. et al.; *Waste Manage.*, **2019**, *95*, 43.

- [42] Pera, J. et Marouz, A.; *Adv. Cem. Bas. Mat.*, **1998**, 7, 49-56.
- [43] Auteur Inconnu, « Cement history & facts », *CEMEX*, 2002, <https://www.cemexusa.com/products-and-services/cement/history-facts#:~:text=Cement%20as%20we%20know%20it,hardens%20when%20water%20is%20added>.
- [44] Lewis, J. A., « Concrete: Scientific Principles », *MATSE*, Department of Materials Science and Engineering – University of Illinois, <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/prin.html>
- [45] Marichol, Tanya. « The Difference Between Cement, Concrete and Mortar », *Linkdin*, novembre 2018, <https://www.linkedin.com/pulse/difference-between-cement-concrete-mortar-tanya-marchiol#:~:text=Cement%2C%20concrete%2C%20and%20mortar%20are,cement%2C%20sand%2C%20and%20gravel>.
- [46] Auteur Inconnu, « Cement History & Facts », Minerals Education Coalition, SME Foundation, 2002, <https://mineralseducationcoalition.org/>
- [47] Canadian Standards Association (CSA). CSA A23.1, « Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Methods of Test for Concrete », 2019.
- [48] « National Building Code of Canada – Part 4, Structural Design », National Research Council of Canada (NRC), 2015.
- [49] « Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM C1437-20 », ASTM International, 2020, <https://www.astm.org/c1437-20.html>
- [50] Canadian Standards Association (CSA). CSA A179.14 « Mortar and grout for unit masonry », 2019.
- [51] McNamara, J.; Morgan, J. L. W.; Zimmer, J.; *Annu. Rev. Biochem.*, **2015**, 84, 895-921.
- [52] Yang, Q.; Du, C.; Zhang, J.; Yang, G.; *J. Mater. Civ. Eng.*, **2020**, 32, 2.

Annexes

Annexe 1. Fiche technique du ciment utilisé dans le mélange de mortier.



Cement Mill Test Report

Month of Issue: March 2022

Plant: St-Constant, Quebec
 Product: Portland Cement Type GU (GU-P)
 Silo: STC: R5, Q1, 12 & 5.
 Manufactured: February 2022

CSA A3001 Standard Requirements

CHEMICAL REQUIREMENTS			PHYSICAL REQUIREMENTS		
	Spec limit	Test Result		Spec limit	Test Result
Rapid Method, X-Ray (A3003-18)			Air content of mortar (%) (A3004-A5) ^{***}	—	7,7
SiO ₂ (%)	—	19,3	Fineness by air permeability (Blaine) (m ² /kg)	—	384
Al ₂ O ₃ (%)	—	4,8	Retained 325 mesh (%) (A3004-A3)	28 max	5,5
Fe ₂ O ₃ (%)	—	3,0	Autoclave expansion (%) (A3004-B5) ^{***}	1.0 max	0,010
CaO (%)	—	62,5	Densité (g/cc) ^{***}		3,1
MgO (%)	5 max	2,7	Compressive strength (MPa) (A3004-C2)		
SO ₃ (%) [*]	3.0 max	4,1	3 days	14.5 min	27,8
Loss on ignition (%) ^{**}	3.5 max	2,2	7 days	20.0 min	34,2
			28 days ^{***}	26.5 min	44,3
Insoluble residue (%) ^{***}	1.5 max	0,5	Time of setting (minutes)		
Na ₂ O (%)	—	0,3	Vicat Initial (A3004-B2)	45 - 375	125
K ₂ O (%)	—	0,8	Mortar Bar Expansion (%) (A3004-C5) ^{***}	0.020 max	0,004
Na ₂ O _{eq} (%)	—	0,83			
Limestone content (%)	5 max	3,55			
Limestone CaCO ₃ (%)	75 min	86,1			
Potential Phase Composition (A3003-08)					
C ₃ S (%)	—	55			
C ₂ S (%)	—	13			
C ₃ A (%)	—	7			
C ₄ AF (%)	—	9			

* If exceeds 3.0%, must comply with a maximum expansion limit of 0.020% at 14 days when tested in accordance with CSA A3004-C5.

** A loss on ignition of 3.5% maximum is allowed for designated portland cements, provided that such cements, when tested in accordance with CSA A3003, but at a furnace temperature of 550±1-25C, show a loss in mass of no more than 3.0%.

*** Current Production run not available - most recent provided.

We hereby certify that the cement represented by the above chemical and physical analyses meets the requirements of the latest version of CSA A3001 including the maximum sulphate expansion limit at 14 days (CSA A3004-C5).

For additional information on this cement test report, please contact our technical representative Arsenio Gonzales at 514-210-6882

ECAN BU - St-Constant Plant
 1 Chemin Lafarge, St-Constant
 Phone: 450-632-7750 #218

Certified By:

Alba Barrios - Quality Coordinator
 18 mars, 2022

Annexe 2. Fiche technique du superplastifiant utilisé dans le mélange de mortier.

RÉDUCTEURS D'EAU À HAUT DEGRÉ / SUPERPLASTIFIANTS

Format principal n° : 03 30 00 03 40 00 03 70 00

PLASTOL™ 6400

RÉDUCTEUR D'EAU À HAUT DEGRÉ – SUPERPLASTIFIANT



EUCLID CHEMICAL

INFORMATION SUR LE PRODUIT

EMBALLAGE

Offert en vrac, en contenants de 1000 litres, en barils de 205 litres et en seaux de 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Un an dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

ASTM C494, Types A et F

ASTM C1017, Type I

AASHTO M194

ANSI/NSF 61

Approuvé par le ministère des Transports du Québec (MTQ)

DESCRIPTION

PLASTOL 6400 est un superplastifiant à base de polycarboxylate qui permet de produire le béton avec un très faible rapport eau/liant. PLASTOL 6400 produit un béton autoplaçant et fluide à faible dose et peut produire jusqu'à 45 % de réduction de la quantité d'eau. PLASTOL 6400 offre les avantages de la technologie polycarboxylate, à savoir des résistances à la compression et une résistance à la flexion élevées ainsi que d'excellentes caractéristiques de prise. PLASTOL 6400 peut être utilisé conjointement avec des ajouts cimentaires et ne contient pas de produits chimiques ou d'ions de chlorure ajoutés connus pour favoriser la corrosion de l'acier. De plus, il est compatible avec la plupart des adjuvants; toutefois, chaque matériau doit être ajouté séparément.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT

CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

- Réduit les coûts de main-d'œuvre
- Permet de réduire la teneur en liant
- Améliore les caractéristiques de stabilité de l'air
- Améliore la maniabilité et facilite la finition
- Réduit ou élimine l'addition de superplastifiant sur le chantier
- Améliore grandement la durabilité et l'apparence de la surface
- Réduit la demande en eau procurant ainsi une meilleure résistance
- Réduit la ségrégation, le ressuage, la fissuration et la perméabilité
- Produit un béton fluide qui développe une résistance au démoulage plus rapidement
- Produit des résistances élevées à court terme lorsqu'utilisé avec des ciments de Type GU et de Type HE

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton fortement armé
- Béton prêt à l'emploi
- Béton à haute performance
- Dalles et béton de masse
- Béton préfabriqué/précontraint
- Béton avec faible rapport eau/liant
- Béton fluide à affaissement élevé
- Béton autoplaçant (BAP), béton autonivelant (BAN)

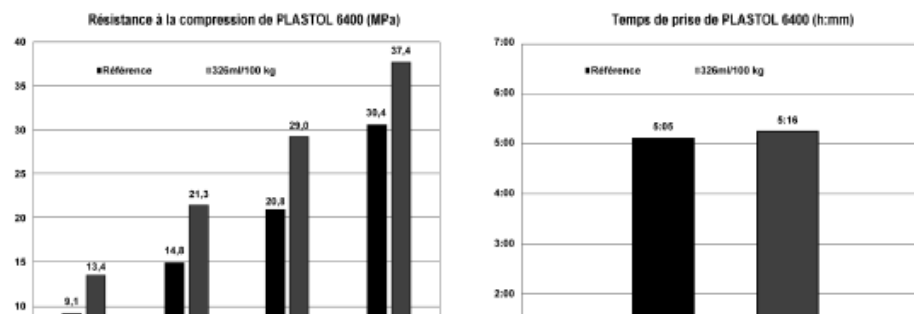
PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- PLASTOL 6400 doit être maintenu à l'abri du gel; toutefois, le gel et le dégel subséquent n'endommagent pas le matériau si ce dernier est mélangé vigoureusement. Ne pas agiter avec de l'air ou avec une lance à air.
- Ajouter au mélange séparément des autres adjuvants.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

DONNÉES TECHNIQUES

DONNÉES RELATIVES À LA PERFORMANCE

Les résultats d'essai suivants ont été obtenus en utilisant les exigences typiques de formulation de la norme ASTM C494, 307 kg/m³ (517 lb/vg³) de liant et une teneur en air similaire (\pm 0,5 %). Ces résultats ont été obtenus en laboratoire avec des matériaux et des formulations qui satisfont aux exigences de la norme ASTM C494. Des changements de matériaux et de formulations peuvent affecter l'efficacité des dosages.



MODE D'EMPLOI

La plage de dosages recommandés pour PLASTOL 6400 est de 200 à 780 ml par 100 kg de liant. Les recommandations en matière de dosage dépendent des caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation. Des dosages plus élevés sont acceptables si des essais préalables sont réalisés et que des confirmations sont obtenues quant à la performance désirée avec les matériaux précis utilisés. PLASTOL 6400 peut être ajouté à l'eau de gâchage initiale ou directement sur le béton fraîchement dosé, puis malaxé 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.

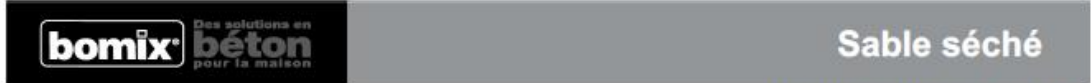
Pour toutes les applications de béton, y compris le béton autoplaçant, le dosage de PLASTOL 6400 variera en fonction de la formulation, des matériaux locaux et des besoins particuliers du producteur de béton. Des formulations d'essais doivent être effectuées afin de vérifier la performance à l'état plastique et durci avec des matériaux locaux. Si la granularité des matériaux n'est pas optimale pour un béton autoplaçant, un modificateur de viscosité pourrait être utilisé pour améliorer la qualité du mélange. Veuillez contacter votre représentant Euclid Chemical afin d'obtenir des recommandations relatives aux formulations d'essai et aux dosages.

Révision : 3.21

La version anglaise de la présente fiche pourrait contenir de l'information plus récente.

GARANTIE : Euclid Canada, (Euclid), garantit uniquement et expressément que ses produits sont sans défauts de matériel ou de main-d'œuvre pendant un (1) an à partir de l'achat. À moins d'être autorisée par écrit par un responsable d'Euclid, aucune représentation ou déclaration verbale ou écrite par Euclid et ses représentants ne peut modifier cette garantie. EN RAISON DE LA GRANDE VARIABILITÉ DES CONDITIONS DE CHANTIER, EUCLID NE FAIT AUCUNE GARANTIE IMPLICITE OU EXPLICITE QUANT À LA QUALITÉ LOYALE ET MARCHANDE OU L'APTITUDE À REMPLIR UNE UTILISATION ORDINAIRE OU PARTICULIÈRE DE SES PRODUITS ET LES EXCLUT DE SA GARANTIE PAR LE FAIT MÊME. Si un produit Euclid ne rencontre pas la garantie, Euclid remplacera le produit, sans frais pour l'acheteur. Le remplacement du produit sera le seul et exclusif remède disponible et l'acheteur n'aura aucune autre compensation pour des dommages supplémentaires ou consécutifs. Toute réclamation doit être faite dans l'année qui suit l'infraction. Euclid n'autorise personne, en son nom, à faire des énoncés verbaux ou écrits qui modifient les renseignements et les instructions d'installation qui se trouvent sur les fiches techniques ou sur l'emballage. Tout produit Euclid qui n'est pas installé selon les renseignements et les instructions d'installation perd sa garantie. Les démonstrations de produits, s'il y en a, sont faites uniquement pour illustrer l'utilisation du produit. Elles ne constituent pas une garantie ou une variante à la garantie. L'acheteur sera l'unique responsable pour déterminer la pertinence des produits Euclid en fonction des utilisations qu'il veut en faire.

Annexe 3. Fiche technique du sable utilisé dans le mélange de mortier.



Fiche Technique – Numéro de produit : 2002

Sable séché

Sable séché tout usage

1. USAGE PRINCIPAL

- 1.1. Le sable sec Bomix® est un sable naturel commun, séché et tamisé. Il est idéal en sous-couche pour patios, trottoirs ou dans les plates-bandes. Puisqu'il est séché, il ne gèle pas en hiver et peut donc être utilisé comme anti-dérapant ou comme poids dans la voiture.

2. EMBALLAGE

- 2.1. Ce produit est disponible en sac 30 kg (66 lb)

3. PREMIERS SOIN

- 3.1. Éviter de respirer la poussière. En cas d'éclaboussure dans les yeux, rincer à grande eau pendant un minimum de 15 minutes.

4. SERVICES TECHNIQUES

- 4.1. Contacter BOMIX® pour de plus amples informations sur les méthodes ou conditions d'application ainsi que pour obtenir la plus récente version des documents techniques.

Tél: 1-800-561-2664, (514) 328-1253

Fax: (514) 328-7694

Les Produits Daubois Inc.

6155, boul. des Grandes-Prairies

Saint-Léonard, Qc H1P 1A5

Canada

- 4.2. <http://www.bomix.ca>

5. GARANTIE

- 5.1. Vous pouvez obtenir les modalités de la GARANTIE LIMITÉE applicable sur <https://www.bomix.ca/fr/produit-garantie.php>. Ou envoyez une demande écrite à Les Produits Daubois Inc., Five Concourse Parkway, Atlanta, GA 30328, USA. @Quikrete Canada Holdings, Limited. Fabriqué par ou sous l'autorité de Les Produits Daubois Inc. ©2022 Quikrete International, Inc.



Analyse granulométrique

Tamis (mm)	% passant
2,5	100
1,25	85 - 95
0,630	70 - 86
0,315	50 - 65
0,160	15 - 25
0,080	0 - 3

6. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

- 6.1. Couleur : Brun
6.2. Densité : 1600 -1650 kg/m³ (100 - 103 lb/pi³)

7. RENDEMENT

- 7.1. Un sac de 30 kg (66 lb) a un rendement d'environ 0,018 m³ (0,65 pi³).