

Centre Eau, Terre, Environnement

Méthode opérationnelle de caractérisation d'embâcles de glace par photogrammétrie à l'aide d'images aériennes par drone

Par

Marc-Antoine Persent

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Sébastien Raymond
INRS Centre Eau Terre Environnement

Examineur externe

Étienne Boucher
Département de géographie
Université du Québec à Montréal

Directeur de recherche

Karem Chokmani
INRS Centre Eau Terre Environnement

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, Karem Chokmani, de m'avoir donné l'occasion de réaliser un projet de maîtrise stimulant, ainsi que pour ses conseils pendant mon parcours. Je désire également remercier l'équipe du Laboratoire TÉNOR sans qui ce projet n'aurait pas pu avoir lieu, plus particulièrement Valérie Plante Levesque et Sophie Dufour-Beauséjour pour leurs conseils, ainsi que les pilotes de drones Hachem Agili et Dominique Thériault. Merci également à Serge Légaré et l'équipe du Centre d'opération gouvernemental au ministère de la Sécurité publique et à Simon Tolszczuk-Leclerc du Centre de géomatique d'urgence de Ressources naturelles Canada pour leur soutien au projet DAVE.

RÉSUMÉ

La gestion des risques est un domaine en constante évolution. L'intensité et la fréquence croissante d'événements environnementaux potentiellement dangereux forcent les parties prenantes à revoir la gestion de ces dangers. À mesure que la technologie évolue, de nouvelles méthodes et outils apparaissent afin de faciliter la prise de décision des gestionnaires. L'avènement des drones en tant qu'outil en est un bon exemple. Son utilisation a récemment augmenté en raison de sa grande polyvalence et de son efficacité dans plusieurs situations. La cartographie est l'un des domaines profitant du développement de cette technologie pour obtenir des résultats diversifiés, rapides et de bonnes qualités.

Cette recherche combine la technologie des drones et la gestion des événements d'embâcles de glace. L'objectif est de ressortir les caractéristiques des embâcles par photogrammétrie, à l'aide d'images prises par drone. La photogrammétrie sera utilisée pour créer un modèle 3D, une orthomosaïque, ainsi qu'un modèle numérique d'élévation. La taille des embâcles, l'emplacement et le volume de glace seront des caractéristiques complémentaires pertinentes qui pourront être dérivées de ces produits et ainsi permettre d'outiller davantage les gestionnaires dans la gestion d'un événement d'embâcle.

Mots-clés : Télédétection ; Photogrammétrie ; Embâcle de glace ; Drone ; Risque naturel

ABSTRACT

Risk management is always in progress. The increasing intensity and frequency of potentially dangerous environmental events forces stakeholders to review the management of these hazards. As technology evolves rapidly, new ways are emerging to help decision-making. The advent of unmanned aerial vehicles as a tool is a good example. Their use has increased recently due to their great versatility and efficiency. Cartography benefits from the development of this technology in order to obtain diversified, fast and good quality results.

This research combines drone technology and ice jam risk management. The objective is to make an in-situ mapping of ice jam by drones, in order to gather punctual information. A procedure to guide the use of UAV in winter conditions will be detailed. Photogrammetry will then be used to create a 3D model of the ice jam following data acquisition. Ice jam length and height will be relevant complementary elements being investigated from UAV data.

Keywords : Teledetection; Photogrammetry; Ice jam; Unmanned aerial vehicle; Natural hazard

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XV
1 INTRODUCTION	16
1.1 CONTEXTE	16
1.2 PROBLÉMATIQUE	20
1.3 OBJECTIFS.....	22
2 REVUE DE LITTÉRATURE	23
2.1 PHOTOGRAMMÉTRIE	23
2.1.1 <i>Historique et évolution</i>	24
2.1.2 <i>Notions théoriques</i>	27
2.1.3 <i>Estimation de structure par mouvement</i>	31
2.1.4 <i>Paramètres du capteur</i>	33
2.2 SYSTÈME AÉRIEN SANS PILOTE.....	35
2.2.1 <i>Types de drones</i>	35
2.2.2 <i>Avantages et limitations des drones</i>	37
2.3 DOMAINES D'ACTIVITÉS.....	40
2.3.1 <i>Gestion des aléas par drones</i>	41
3 MÉTHODOLOGIE	45
3.1 SITES ÉTUDIÉS	45
3.2 MATÉRIELS	47
3.2.1 <i>Drone</i>	47
3.2.2 <i>Outil de captage</i>	48
3.2.3 <i>Équipements terrestres</i>	49
3.3 MÉTHODOLOGIE	50
3.3.1 <i>Protocole d'acquisition d'images haute résolution par drone pour les événements d'embâcles de glace</i>	50
3.3.2 <i>Création de l'orthomosaïque et du modèle numérique d'élévation par photogrammétrie</i>	55
3.3.3 <i>Calcul du volume de glace</i>	59
4 RÉSULTATS ET DISCUSSION	61
4.1 RIVIÈRE ST-FRANÇOIS.....	61

4.1.1	<i>Protocole de déploiement et d'acquisition d'images</i>	61
4.1.2	<i>Stratégie de traitement de données</i>	64
4.1.3	<i>Calcul du volume de glace</i>	68
4.2	RIVIÈRE L'ACADIE	71
4.2.1	<i>Protocole de déploiement et d'acquisition d'images</i>	71
4.2.2	<i>Protocole de traitement de données</i>	73
4.2.3	<i>Calcul de volume de glace</i>	77
4.3	INTÉGRATION DE LA STRATÉGIE DANS LA GESTION DES EMBÂCLES PAR LE MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE	80
5	CONCLUSION	83
6	BIBLIOGRAPHIE	85
7	ANNEXES	90

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 : EMBÂCLE DANS LE PORT DE MONTRÉAL, FIN DU XIXE - DÉBUT XXE SIÈCLE. (CENTRE D'HISTOIRE DE MONTRÉAL, S.D)	17
FIGURE 2-1 : ÉVOLUTION DE L'UTILISATION DES TECHNIQUES PHOTOGRAMMÉTRIQUES DE 1850 À 2019 (SELON KONECNY DANS TOURNADRE)	25
FIGURE 2-2 : PRINCIPE DE LA VISION BINOCULAIRE (KRAUS ET WALDHAUSEL DANS HENRY, 1999)	28
FIGURE 2-3 : ILLUSTRATION DE L'ORIENTATION RELATIVE ET ABSOLUE (INSPIRÉ DE LUHMANN ET AL., 2014)	30
FIGURE 2-4 : EXEMPLE DE SCHÉMA D'UNE PROCÉDURE PHOTOGRAMMÉTRIQUE (INSPIRÉ DE LUHMANN ET AL., 2014)	30
FIGURE 2-5 : PRINCIPE DE CAPTAGE SELON LE PRINCIPE D'ESTIMATION DE STRUCTURE PAR MOUVEMENT (WESTOBY ET AL., 2012).....	32
FIGURE 2-6 : TRIANGLE D'EXPOSITION DE LA CAPTURE D'IMAGES (O'CONNOR ET AL., 2017).....	33
FIGURE 2-7: ÉVOLUTION DU NOMBRE D'ARTICLES INCLUANT LES DRONES EN RECHERCHE ET AYANT POUR THÈME LA GESTION DE RISQUES ENVIRONNEMENTAUX (TIRÉ DE GOMEZ AND PURDIE, 2016)	41
FIGURE 3-1 : ZONE D'ÉTUDE	45
FIGURE 3-2: ZONE DE SURVOL - RIVIÈRE SAINT FRANÇOIS	46
FIGURE 3-3: ZONE DE SURVOL - RIVIÈRE L'ACADIE	46
FIGURE 3-4 : DRONE OBSERVER 6.....	47
FIGURE 3-5 : CAMÉRA SONY A6000	48
FIGURE 3-6 : STATION TOTALE TX06+	49
FIGURE 3-7 : PROTOCOLE D'ACQUISITION D'IMAGES HAUTE RÉOLUTION PAR DRONE	51
FIGURE 3-8 : EXEMPLE DE SURVOL EFFECTUÉ AVEC LE LOGICIEL MISSION PLANNER	53
FIGURE 3-9 : EXEMPLE DE RECOUVREMENT VERTICAL ET LONGITUDINAL DÉSIRÉ LORS D'UN SURVOL DE DRONE	54
FIGURE 3-10 : STRATÉGIE DE TRAITEMENT DE DONNÉES.....	56
FIGURE 3-11 : CHAÎNE DE TRAITEMENT DE PIX4D.....	58
FIGURE 3-12 : EXEMPLE DE COMPARAISON DE LA DIFFÉRENCE DE HAUTEUR DES POINTS DE CONTRÔLE	59
FIGURE 4-1 : TRAJET DES VOLS 1 ET 2 SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	62
FIGURE 4-2 : TRAJET DU VOL 3 SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	63
FIGURE 4-3 : TRAJET DES VOLS 4 ET 5 SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	63

FIGURE 4-4 : ORTHOMOSAÏQUE DES VOLS 3 ET 5 SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	66
FIGURE 4-5 : MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION DES VOLS 3 ET 5 SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	67
FIGURE 4-6 : CARTE D'ÉPAISSEUR DE GLACE DE L'EMBÂCLE SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	69
FIGURE 4-7 : VOL 1 AU-DESSUS DE LA RIVIÈRE L'ACADIE	71
FIGURE 4-8 : COMPARAISON DE LA DIFFÉRENCE DE HAUTEUR DES POINTS DE VALIDATION ENTRE LA STATION TOTALE ET LE MNE	73
FIGURE 4-9 : ORTHOMOSAÏQUE DE LA RIVIÈRE L'ACADIE	75
FIGURE 4-10 : MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION DE LA RIVIÈRE L'ACADIE	76
FIGURE 4-11 : CARTE D'ÉPAISSEUR DE GLACE DE L'EMBÂCLE SUR LA RIVIÈRE L'ACADIE	78
FIGURE 4-12: PLAN INTÉGRÉ DE GESTION DES RISQUES D'EMBÂCLES DE GLACE	82

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1 : RECENSEMENT DES TYPES DE DRONES ET DE LEURS CARACTÉRISTIQUES DE PROPULSION (TIRÉ D'EISENBEISS, 2009).....	36
TABLEAU 2-2 : TABLEAU SYNTHÈSE DES AVANTAGES ET DES INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTS MOYENS DE CAPTAGE	38
TABLEAU 3-1 : PARAMÈTRES GÉNÉRAUX DU DRONE	48
TABLEAU 3-2 : PARAMÈTRES GÉNÉRAUX DE LA CAMÉRA	49
TABLEAU 4-1 : PARAMÈTRES DE VOL DU DÉPLOIEMENT SUR LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	62
TABLEAU 4-2 : TEMPS DE TRAITEMENT DES DONNÉES DE LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	65
TABLEAU 4-3 : INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES DE L'ORTHOMOSAÏQUE DE LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS	66
TABLEAU 4-4 : PARAMÈTRES DU VOL DE LA RIVIÈRE L'ACADIE	71
TABLEAU 4-5 : TEMPS DE TRAITEMENT DES DONNÉES DE LA RIVIÈRE L'ACADIE	74
TABLEAU 4-6 : INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRE DE L'ORTHOMOSAÏQUE DE LA RIVIÈRE L'ACADIE	75

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASPRS: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

CCCOT: Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre

COG : Centre des opérations gouvernementale

DAVE: Dispositif d'alerte et de vigilance pour les embâcles de glace

ECCC : Environnement et Changement climatique Canada

GCP: Ground control point

MNE: Modèle numérique d'élévation

MSP: Ministère de la Sécurité publique

NOTAM: Notice to airmen

OBV : Organisme de bassin versant

OMSC: Organisation municipal de sécurité civile

ORSC: Organisation régional de la sécurité civile

PMSC: Plan municipal de sécurité civile

RAC: Règlement sur l'aviation canadienne

RIACT: River ice automated classifier tool

SAP: Système d'alerte aux partenaires

SFM: Structure from motion

SNAP: Système national d'alerte au public

TENOR: Télédétection environnementale et nordique

UAV: Unmanned aerial vehicle

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

À travers son histoire, le Canada a subi et s'est relevé de plusieurs sinistres majeurs qui ont marqué les esprits. Qu'il s'agisse des inondations du Saguenay en 1996 ou du feu de forêt de Fort McMurray en 2017, ces événements ont mis en évidence les besoins de la société à prévenir et à se préparer pour faire face à ces situations extrêmes. Dans un contexte de changements climatiques où la fréquence et l'intensité des événements naturels dangereux seront amplifiées (gouvernement du Canada, 2019), il est pertinent d'avoir des structures permettant d'encadrer l'engagement des différents acteurs afin d'optimiser les ressources et d'offrir une réponse coordonnée lors de l'avènement d'un sinistre. La mise au point d'un cycle de gestion de risques efficace de la part des parties prenantes est donc pertinente et permet de minimiser l'impact des sinistres sur la population.

Au Canada, les inondations sont l'un des risques naturels les plus importants lorsque l'on parle de dommages et d'impact sur la population. Ces inondations peuvent survenir lors de grandes crues ou lors de situations plus imprévisibles comme la formation d'embâcles de glace. Bien que les crues printanières soient celles qui retiennent le plus l'attention du fait de leur ampleur et de leur durée dans le temps, 50% des inondations au Québec sont créées par les glaces de rivières (Turcotte, 2017). En raison des changements climatiques, le régime d'embâcles de glace canadien et les risques liés aux débâcles hâtives ou successives sont appelés à se modifier (Beltaos et Prowse 2008, Chen et She 2020, Prowse et al. 2017, Rokaya et al. 2022). Au Québec, ce sont les municipalités, avec l'assistance du ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP), qui doivent composer annuellement avec la prévention et les conséquences des inondations par embâcle sur les populations riveraines (Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie, 2009). Certaines municipalités s'adjoignent parfois d'organismes de bassin versant (OBV), de groupe de recherche universitaire ou de firmes de surveillance pour faire le suivi de rivières connues pour leurs embâcles. Leur formation peut être engendrée par l'accumulation de frasil, par la dégradation thermique du couvert de glace le rendant plus vulnérable à une fracturation mécanique, ainsi que par la hausse subite du débit engendrant l'augmentation de la capacité de transport de la rivière et permettant de mettre en mouvement le couvert de glace (Beltaos, 1995). Suivant la mise en mouvement de la glace, un blocage peut se produire aux endroits précaires où la morphologie de la rivière favorise son immobilisation. Le rétrécissement du chenal, la sinuosité, la présence d'îles, la présence de ponts, la confluence de

rivières ainsi que le bris de pente sont les paramètres considérés pour déterminer la susceptibilité d'une zone à immobiliser la glace et créer un embâcle (DeMunck, 2013). L'obstruction d'une rivière peut s'allonger sur plusieurs kilomètres et avoir de graves répercussions sur la population se trouvant aux abords des cours d'eau. En effet, ce blocage peut avoir comme conséquence d'empêcher l'écoulement normal de l'eau et donc, de créer des inondations le long de l'embâcle ainsi qu'en amont de celui-ci. De plus, l'événement peut se maintenir sur une période indéterminée variant de quelques heures à plusieurs jours en fonction des facteurs météorologiques ou des actions prises par les autorités. Leur rapidité de formation et les inondations rapides qui peuvent s'en suivre augmentent la dangerosité de cet aléa, comparativement aux crues printanières où la montée des eaux est lente et prévisible. Les embâcles peuvent donc entraîner des conséquences socio-économiques rapides et majeures qui s'étendent du blocage de voies navigables jusqu'à la destruction d'habitations riveraines, de ponts et de routes. Malgré leur dangerosité et leurs impacts potentiels sur la population, ils ne sont pas pris en compte dans l'élaboration des cartes de zones inondables. Ils exposent ainsi la population à un risque encore méconnu au Québec et qui pourtant est historiquement bien présent sur le territoire.

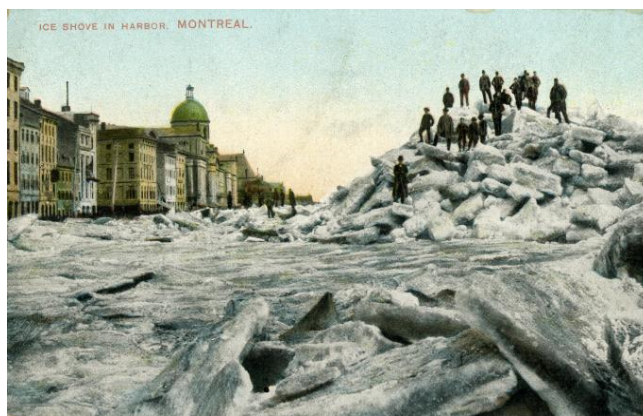


Figure 1-1 : Embâcle dans le port de Montréal, fin du XIXe - début XXe siècle. (Centre d'histoire de Montréal, s.d)

De plus, les ingénieurs, hydrologues, géographes et autres professionnels connexes graduant des universités du Québec ont souvent très peu de formation et de connaissance sur la dynamique hivernale des cours d'eau (Morse et Turcotte, 2018). Combiné à l'irrégularité des conditions de glace et l'aspect grandement imprévisible de l'hiver, ce manque de connaissance a pour conséquence une minimisation des impacts glaciels dans les différents projets concernant les cours d'eau (Morse et Turcotte, 2018). Les embâcles de glace entrent dans les événements peu documentés et augmentent la vulnérabilité de la population riveraine, puisque d'une part, elle

n'est pas outillée à faire face à ce genre d'aléa, et d'autre part, la sphère publique a longtemps minimisé les risques liés aux processus glaciels. Le caractère complexe et la difficulté à prédire les événements glaciels ajoutent à leur dangerosité et ouvrent la porte aux recherches essayant d'outiller les gouvernements à mieux prévenir et se préparer à ces situations. Malheureusement, aucun outil ne permet encore d'effectuer des prédictions fiables en lien avec les événements d'embâcles de glace. Les interactions entre les régimes glaciels, hydroclimatiques et morphologiques sont encore peu documentées à ce jour

C'est dans ce contexte que le projet de dispositif d'alerte et de vigilance pour les embâcles de glace (DAVE) a été mis sur pied. En collaboration avec le ministère de la Sécurité publique du Québec, le ministère de l'Environnement et Changement climatique du Canada (ECCC), le centre de géomatique d'urgence et financé par le département de recherches et développement de défense Canada, DAVE a été lancé en 2017 afin de développer un dispositif d'aide à la décision pour la prévention et l'intervention face aux risques d'inondations par embâcles de glace. Œuvrant dans les phases de prévention et d'intervention, ce dispositif vise à renforcer le système régional de prévision fournissant des veilles et des alertes d'embâcles à l'échelle régionale. De plus, il inclut une procédure de déploiement de drones afin de caractériser l'embâcle de glace une fois formé. Quatre différents volets seront inclus dans l'ossature du dispositif : la reconnaissance des patrons hydrométéorologiques associés à la débâcle, la caractérisation du couvert de glace, la prédisposition du chenal à un embâcle et le processus de caractérisation de l'embâcle par photogrammétrie (Gauthier et al., 2017).

L'objectif de la reconnaissance des conditions hydrométéorologiques propices à la débâcle est d'obtenir des alertes lorsque la possibilité d'une débâcle est détectée en temps réel. Pour ce faire, un algorithme sera développé afin de reconnaître certains patrons hydrométéorologiques distincts qui prédisposent à la débâcle du couvert. Il sera créé avec l'aide de la base de données de températures et précipitations d'Environnement Canada et la base de données historique des embâcles de glace du ministère de la Sécurité publique (Madaeni et al., 2019). La caractérisation du couvert permettra de déterminer la présence ou non de glace mobilisable dans le cas d'une alerte de débâcle signalée par l'algorithme de détection des patrons hydrométéorologiques. Cette cartographie du couvert se fera à l'aide d'une estimation d'ensemble de trois algorithmes de classification de glace. L'estimation d'ensemble permettra la meilleure caractérisation possible du couvert en balançant les forces et faiblesses de chaque algorithme. La prédisposition du chenal donnera un indice sur l'endroit où l'embâcle est le plus susceptible de se former selon la morphologie et les caractéristiques de la rivière. L'indice de prédisposition sera également créé

par un algorithme décelant les caractéristiques qui prédisposent un embâcle à se former dans une rivière, incluant le rétrécissement d'un cours d'eau, sa sinuosité, la présence d'îles, le bris de pente et la présence de pont, l'algorithme de prédisposition donnera un indice de risque pour des tronçons de 250 mètres de la rivière. Il pourra également être paramétré pour fonctionner sur toutes les rivières du Québec selon le besoin (DeMunck, 2013).

Finalement, le processus opérationnel de caractérisation d'embâcles de glace par photogrammétrie avec l'aide de photos prises par drone permettra la cueillette d'information rapide sur le terrain. Ainsi, un protocole de déploiement et de traitement de données sera créé afin d'encadrer ce volet et permettre un résultat cartographique le plus constant possible lorsqu'il sera utilisé. Cette stratégie pourrait ainsi être intégrée au cycle de gestion du MSP dans une logique d'interopérabilité, afin d'épauler les gestionnaires en apportant des informations supplémentaires lors d'embâcles de glace pouvant causer des dommages. Ce projet fait partie intégrante du dispositif d'alerte et de vigilance pour les embâcles de glace qui viendra également s'implanter comme outil de surveillance et de veille pour suivre en temps réel la probabilité qu'un événement d'embâcle se produise sur le territoire québécois. L'imbrication de ces quatre volets donnera une approche plus globale de la problématique. Ainsi, il en ressortira des résultats qui tiendront compte de plusieurs processus pouvant augmenter la capacité de prévision de cet aléa. Les informations issues de DAVE fourniront une aide aux intervenants afin d'anticiper le risque de formation d'embâcle de glace, tout en assurant une sécurité accrue des collectivités. Ce mémoire repose sur le quatrième volet et consiste à caractériser un embâcle de glace à l'aide d'images prises en déployant un drone sur place lorsqu'un événement est répertorié. Le projet s'inscrit donc davantage dans la phase d'intervention, contrairement aux autres volets et viendra ajouter des informations ponctuelles sur l'embâcle pouvant en faciliter la gestion.

1.2 Problématique

Les embâcles de glace sont des événements dynamiques, récurrents et imprévisibles. La prévision et la gestion de ces événements peuvent donc être particulièrement difficile à l'échelle provinciale. La surveillance de ce genre de phénomène se fait par le ministère de la Sécurité Publique du Québec en collaboration avec les municipalités et l'information est centralisée au centre des opérations gouvernementale (COG) à Québec. Les municipalités, supportées par les organisations régionales de la sécurité civile (ORSC), ont la responsabilité de déployer les moyens nécessaires afin d'assurer la sécurité de la population. Cependant, peu d'outils sont mis à leur disposition afin de les épauler dans l'acquisition d'information sur le terrain. De ce fait, certaines villes et municipalités font directement affaire avec des entreprises privées pour les aider dans leur gestion des risques liés aux embâcles de glace. Cette offre de service permet d'améliorer la prévention de ces événements sur plusieurs zones à risques. En revanche, le coût du service exclu cette avenue pour la majorité des plus petites municipalités prises avec cette problématique. C'est pourquoi il est important de les supporter en développant des outils pouvant être utilisés par les instances publiques.

Le développement d'outils ou de techniques pour améliorer la gestion des embâcles de glace représente un défi à plusieurs niveaux. D'abord, la collecte de données aux abords des rivières ou directement sur le couvert de glace est peu sécuritaire dans ce contexte. C'est l'une des raisons pour lesquelles la télédétection par satellites est généralement utilisée à des fins de caractérisation. Son utilisation par le COG permet d'appuyer les prédictions de débâcle lors de la fonte du couvert de glace, tout en offrant un bon rapport coût/bénéfice. Des méthodes de caractérisation de glace de rivière sont déjà en place de façon opérationnelle, utilisant des images satellitaires. Des cartes de glace sont ainsi créées principalement en utilisant des images radar sur lesquelles des algorithmes ont été développés afin de déterminer la maturité du couvert. La technologie radar est privilégiée, puisqu'elle permet de faire l'acquisition de données malgré la présence de nuages. Ces cartes de maturité du couvert sont ensuite utilisées pour planifier les travaux d'affaiblissement par aéroglisseur ou par d'autres types d'équipement. Cependant, une planification à long terme d'acquisition doit être faite en collaboration avec plusieurs partenaires gouvernementaux et il n'est jamais certain d'avoir la prise d'image demandée, le MSP n'ayant pas toujours la priorité sur la disponibilité des satellites. L'acquisition à court terme d'images reste donc un défi d'autant plus important puisque la disponibilité limitée des satellites est un enjeu prioritaire. Également, la faible périodicité possible des acquisitions est un facteur pouvant empêcher un suivi rapide d'événements comme les embâcles de glace. Effectivement, souvent

espacé de plusieurs jours, la durée entre deux passages des satellites est un enjeu majeur lorsque l'événement à cartographier se produit rapidement et peut être de courte durée. En plus de la périodicité, la résolution spatiale des images radar par satellite est souvent trop grande pour déceler les impacts d'un embâcle de glace sur son environnement.

Ces outils sont surtout utilisés dans les phases de prévention et de préparation à un événement d'embâcle. Pour ce qui est de la phase d'intervention lorsque l'événement se produit, la télédétection par satellites n'est pas adaptée à répondre aux besoins terrain. C'est ici que le potentiel des drones gagne en pertinence, puisqu'ils sont un bon compromis entre la résolution spatiale, la fréquence de survol et l'accessibilité à court terme. Puisqu'elle est sécuritaire et qu'elle possède une bonne capacité d'adaptation aux conditions climatiques, (Rokaya et al. 2022) la télédétection par drone semble être une technologie qui pourrait répondre à ces enjeux.

Considérant les conséquences possibles sur la population, une intervention rapide est importante par les acteurs responsables de la sécurité civile lorsqu'un embâcle se produit dans une zone urbaine. À partir de la rive, une pelle mécanique peut être utilisée pour déplacer ou enlever la glace et ainsi faciliter le passage de l'eau pour limiter les inondations. Il est présentement difficile d'estimer le volume de glace à enlever puisqu'aucun outil n'est présentement disponible au MSP pour relever ces données. Ce type d'outil pourrait aider dans la planification des travaux, ainsi que dans l'estimation du temps avant un retour à la normale. Pour combler ces lacunes, ce travail vient élaborer une procédure opérationnelle de caractérisation d'embâcle de glace par photogrammétrie effectuée avec des images acquises par drone. L'utilisation du drone permettra un déploiement et une prise de données rapide alors que le choix de la photographie couleur haute résolution limitera le coût de la technologie employée. Les résultats de ce déploiement permettront de fournir des informations supplémentaires aux intervenants gouvernementaux afin de mieux les supporter lors de la gestion d'un embâcle. Les produits cartographiques dérivés permettront de rendre compte de la situation et de l'analyser afin de faciliter le processus décisionnel pour les interventions d'urgence sur l'embâcle en cas d'inondations. La procédure ainsi développée inclurait les étapes allant de la prise de données aux traitements, et l'analyse post-terrain. Cette stratégie d'acquisition et de traitement pourrait être intégrée au niveau des processus de gestion des ORSC lorsqu'un embâcle est déclaré. L'amélioration des technologies liées au drone et l'augmentation de son utilisation dans plusieurs domaines en font un excellent outil pour le type de recherche qui nous concerne

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est donc de développer une méthode opérationnelle de caractérisation d'embâcles de glace par photogrammétrie, grâce à des images acquises par drone. Pour ce faire, 3 objectifs secondaires ont été définis.

1. Proposer un protocole d'acquisition d'images haute résolution par drone pour les événements d'embâcles de glace;
2. Développer une méthode de traitement d'images utilisant la photogrammétrie afin de créer une orthomosaique et un modèle numérique d'élévation (MNE);
3. Estimer le volume de glace contenu dans l'embâcle à l'aide du MNE.

Le résultat de ces objectifs pourra éventuellement servir de base pour inclure les drones dans les processus de démantèlement d'embâcles de glace par le MSP.

Ce mémoire est divisé en trois parties. La première partie consistera en une revue de littérature sur les drones, la photogrammétrie à courte portée et son utilisation avec des données acquises par drones. La deuxième partie décrira les moyens ainsi que la méthodologie utilisée pour la prise et le traitement de données. La dernière partie inclura les résultats obtenus et la discussion sur ces résultats.

2 Revue de littérature

La télédétection peut se définir comme l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre, de l'atmosphère et des océans, sans contact direct avec ceux-ci (Gouvernement du Canada, 2015). Elle est donc un outil qui permet de décrire, d'analyser, de caractériser ou de planifier le développement et la gestion d'un milieu. En constante évolution, elle nous a permis d'avoir un angle de vue différent sur l'environnement qui nous entoure et de mieux comprendre son évolution dans le temps. L'augmentation des observations terrestres par satellites et le suivi des changements à grande échelle ont introduit la télédétection comme outil essentiel de sensibilisation et de prise de conscience environnementale de nos sociétés. De plus, la croissance rapide de cette discipline, et de la science entourant l'observation de la terre, ont sans cesse augmenté les possibilités de son application. De nos jours, elle s'intègre dans plusieurs systèmes de décision grâce à sa flexibilité, son efficacité et son faible coût (Bonn et Rochon, 1992). Sa polyvalence permet son utilisation dans un nombre grandissant de domaines et peut intervenir comme outil complémentaire aux méthodes traditionnelles déjà en place. Le développement de nombreuses techniques a contribué à son essor ainsi qu'à sa reconnaissance à travers le monde. La photogrammétrie est l'une de ces techniques, s'étant inscrite et ayant laissé sa marque dans la ligne du temps. Évoluant parallèlement à la photographie, la photogrammétrie a été utilisée grâce à plusieurs plateformes de captage, terrestres ou aériennes. La miniaturisation des appareils photographiques et le développement des drones dévoilent un nouveau pan de cette technologie qui n'a été que très peu exploitée. Ces nouvelles plateformes démontrent un grand potentiel dans l'application de nouvelles techniques photogrammétriques en s'additionnant à l'augmentation de la puissance informatique. Dans cette section, nous allons dresser un constat des études utilisant la photogrammétrie, en plus d'approfondir sur les drones en télédétection et leur utilisation dans un contexte de catastrophes naturelles. Cette revue permettra d'établir le contexte global dans lequel s'inscrit ce travail.

2.1 Photogrammétrie

La photogrammétrie regroupe les méthodes et techniques qui permettent de déduire de l'information qualitative ou quantitative à partir de photographies d'images (Boulianne, 2012). En d'autres mots, nous pouvons la définir comme étant la science permettant d'obtenir des informations précises en rapport à des objets ou à l'environnement, à l'aide de procédés de

mesure et d'interprétation d'images photographiques, de patrons d'énergie électromagnétique radiante, ou d'autre phénomène (ASPRS, 2012). En principe, les méthodes photogrammétriques peuvent s'appliquer dans toutes les situations où l'objet mesuré peut être photographié. La reconstruction numérique et géographique de façon tridimensionnelle d'un objet représente donc l'objectif principal de cette mesure (Luhmann et al., 2014). Elle possède plusieurs avantages sur les autres moyens de captage. Tout d'abord, elle permet de considérer une gamme d'échelles très étendue allant d'une échelle très petite aux images prises à haute altitude et couvrant beaucoup de territoire. De plus, elle représente une solution de captage économique qui offre la possibilité de mesurer des données temporelles à faible coût. Finalement, elle permet la collecte d'une infinité de points se trouvant sur les photos et ne perd qu'un minimum d'information en transformant un objet bidimensionnel en trois dimensions lors du procédé (Boulianne, 2012). Bien qu'elle existe et qu'on l'utilise depuis longtemps, la photogrammétrie s'est modifiée et a évolué pour arriver à ce que l'on connaît aujourd'hui. Utilisant la puissance de la technologie informatique pour donner des résultats plus complexes et volumineux, elle s'insère maintenant dans plusieurs schémas de décision comme outil fiable et flexible et apparaît maintenant dans de nombreux domaines. Effectivement, les techniques photogrammétriques se sont perfectionnées avec l'arrivée des ordinateurs et leur puissance de traitement sans cesse grandissante. Pour bien comprendre les principes fondamentaux de cette science, il est important de revoir la manière dont la photogrammétrie est apparue et a réussi à évoluer conjointement aux progrès informatiques.

2.1.1 Historique et évolution

La photogrammétrie est apparue parallèlement à l'invention de la photographie au 19^e siècle. Ses premières utilisations se faisaient dans le domaine de l'architecture. Ce n'est que plus tard que ces techniques se sont appliquées à la cartographie (Luhmann et al., 2014). Considéré comme le père de la photogrammétrie, Aimé Laussedat commença à expérimenter vers 1849 différentes mesures d'objet faites à partir de perspective photographique (Luhmann et al., 2014 ; Tournadre, 2015). Il expérimente entre autres sur la façade de l'hôtel des invalides à Paris, qui sera considéré comme le premier travail photogrammétrique. À l'époque, Laussedat renvoyait ses travaux au terme métrophotographie. Ce n'est que quelques années plus tard que le terme photogrammétrie fut employé par l'architecte allemand Albrecht Meydenbauer (Luhmann et al., 2014). Il utilisa des techniques similaires à Laussedat dans des travaux architecturaux en Allemagne (Henry, 1999). Éventuellement, deux types de photogrammétrie se distingueront en fonction du moyen de captation utilisé pendant la prise de données : elle peut être terrestre ou aérienne.

La photogrammétrie terrestre fut d'abord utilisée au 19^e siècle avant la création des avions habités et le perfectionnement des technologies entourant la prise de photo aérienne. Elle a notamment été pratiquée dans le domaine militaire afin d'effectuer des reconnaissances et de cartographier les champs de bataille.

La photogrammétrie aérienne quant à elle est apparue avec le développement de l'aviation au début et tout au long du 20^e siècle. Cette avancée technologique a permis l'apparition de nouveaux systèmes de captation permettant de tester les techniques photogrammétriques aux images aériennes. Auparavant, ces techniques n'étaient appliquées qu'aux images terrestres. Ainsi, les progrès de l'aviation comme moyen de captage et l'amélioration des systèmes d'imagerie et de traitement numérique ont drastiquement changé les procédures photogrammétriques. De nos jours, l'enregistrement et le traitement numérique des images offrent la possibilité d'un flux de données rapide, de la prise des images à la présentation du résultat final (Luhmann et al., 2014). Pour en arriver à ce point, la photogrammétrie est passée par plusieurs cycles de développement. Quatre générations peuvent être identifiées dans l'évolution de cette science (Konecny, 1985 dans Tournadre, 2015).

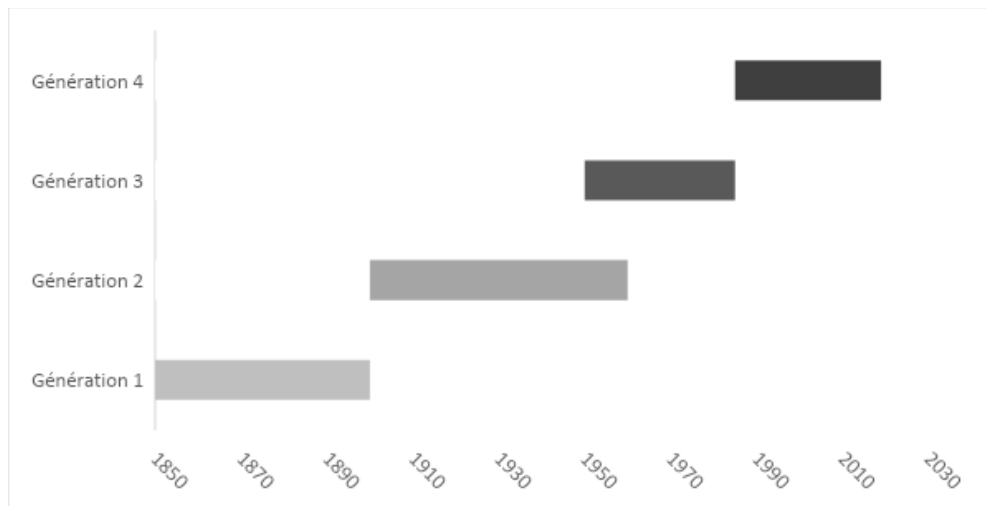


Figure 2-1 : Évolution de l'utilisation des techniques photogrammétriques de 1850 à 2019 (Selon Konecny dans Tournadre)

- Génération 1 : L'apparition de la planche photogrammétrique de 1850 à 1900. Elle sera éventuellement remplacée par les restituteurs stéréoscopiques
- Génération 2 : La photogrammétrie analogique de 1900 à 1960
- Génération 3 : La photogrammétrie analytique de 1950 à 1985
- Génération 4 : La photogrammétrie numérique depuis les années 1985

La première génération engloba les débuts de la photogrammétrie terrestre jusqu'à l'arrivée des premiers avions et des images aériennes. Ce fut une phase expérimentale et pionnière qui inclut également le début de la photogrammétrie par ballon (Schenk, 2005). Cependant, la planche photogramétrique prévalait au 19^e siècle et fut un outil fiable afin de faire différentes mesures. Des distances et autres informations pouvaient être calculées grâce à des lignes de perspectives dessinées à partir de photographies d'objets sous différents angles. On renvoie surtout l'utilisation de la planche à la photogrammétrie terrestre puisque l'aviation n'était pas encore assez évoluée à cette époque. La première génération s'acheva avec la mise au point des premiers restituteurs stéréoscopiques (Tournadre, 2015).

La deuxième génération a été mise en place et popularisée vers la fin du 19^e siècle avec l'avènement de la stéréoscopie et l'apparition des avions comme moyen de captage (Tournadre, 2015 ; Schenk, 2005). Nommée photogrammétrie analogique, elle utilise des films argentiques ainsi que du matériel mécanique et optique pour déplacer et orienter les images afin de rétablir la vision stéréoscopique et extraire de l'information (Boulianne, 2012). Le résultat de cette méthode est le dessin métrique et elle perdure jusqu'à l'avènement de la photogrammétrie analytique.

C'est en effet vers la deuxième moitié du 20^e siècle que l'on voit l'apparition de la photogrammétrie analytique avec l'avancement technologique qui permet désormais de remplacer des opérations auparavant manuelles, par des opérations faites par ordinateur. À la suite d'une phase d'orientation manuelle, l'ordinateur peut maintenant transformer les coordonnées des images en coordonnées de terrain, et permettre leur exploitation dans certains logiciels (Tournadre, 2015). En bref, la restitution est maintenant partagée entre des étapes manuelles et automatiques qui sont effectuées par des ordinateurs. Leur faible puissance de l'époque, la réticence des manufacturiers à mettre de côté la photogrammétrie analogique qui avait fait ses preuves, et le coût des solutions analytique a cependant ralenti son utilisation et son développement (Boulianne, 2012). Ce n'est que vers les années 1960 qu'elle a finalement pris son envol et est devenu une technique reconnue et vastement utilisée (Boulianne, 2012).

Finalement, la photogrammétrie numérique apparaît avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs qui prennent davantage de place dans le traitement des données. Les phases d'orientation à partir de points homologues auparavant faites manuellement sont désormais effectuées par l'ordinateur. Le rôle de l'opérateur devient minime comparativement à la photogrammétrie analogique ou analytique. Une autre différence marquante est le fait d'utiliser des images sur des fichiers informatiques plutôt que sur des films (Boulianne, 2012). De plus,

l'opérateur n'a pas l'obligation d'avoir des appareils photo métriques qui respectent des critères bien précis comme pour les techniques précédentes (Héno, 2019). En effet, n'importe quel appareil de captation peut être utilisé pour effectuer le travail, par exemple un téléphone équipé d'une caméra. En plus de ces changements dans les moyens de captation, l'automatisation a vu naître deux procédures qui se distinguent, soit la photogrammétrie hors ligne permettant de générer les résultats après l'acquisition et le traitement des images, et la photogrammétrie en ligne qui génère en temps réel les résultats pendant la prise de données (Luhmann et al., 2014). L'automatisation et le court temps de traitement permettent maintenant à ces procédures de s'intégrer dans des schémas de prise de décision en ajoutant des informations pertinentes pouvant améliorer la gestion de divers événements.

2.1.2 Notions théoriques

Afin de bien comprendre la pertinence et l'évolution de la photogrammétrie, il est important de s'intéresser aux concepts fondamentaux sur lesquels elle se base. Pour simplifier la notion, la photogrammétrie est l'équivalent d'une reproduction de la vision stéréoscopique humaine. La stéréoscopie peut se définir comme étant le procédé de vision impliquant la fusion de deux images (Boulianne, 2012). Contrairement à la vision monoscopique, elle permet de voir le relief grâce à l'interprétation que le cerveau fait à partir de ces deux images. En effet, le cerveau analyse la différence de distance sur la rétine, appelé parallaxe, entre les images reçues par chacun des yeux et permet de déduire une troisième dimension. En d'autres mots, on peut la définir la parallaxe comme étant le déplacement apparent d'un point image causé par un changement de point d'observation (Boulianne, 2012). L'enjeu de la photogrammétrie est de reproduire ce phénomène et de déduire une profondeur grâce à deux images se recoupant dans l'espace. En d'autres mots, le but est de simuler cette reconstitution faite par le cerveau grâce à différents procédés. Le principe de stéréoscopie est donc l'un des plus importants en photogrammétrie. La figure 2-2 démontre le principe de la vision humaine et de la stéréoscopie. Les points P et Q représentent des objets à des distances différentes dans l'espace par rapport au point d'observation. L'angle de l'image rétinienne gauche ne permet pas de voir la profondeur puisque les objets sont alignés par rapport à cet angle de vue et donc, la parallaxe est nulle ($P_1 = Q_1$). La notion de profondeur apparaît grâce à la parallaxe de l'image rétinienne droite (P_2Q_2) qui démarque les deux images lors de leur fusionnement.

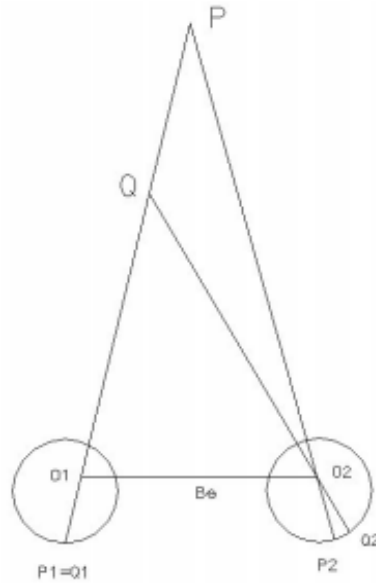


Figure 2-2 : Principe de la vision binoculaire (Kraus et Waldhausel dans Henry, 1999)

Il est donc possible de recréer le même processus avec deux images prises de points de vue différents. Pour reconstituer cette vision, plusieurs outils optiques comme le stéréoscope à miroirs, le stéréoscope à lentille, un stéréorestituteur et maintenant l'ordinateur peuvent être utilisés. Cependant, il est important de trouver certains paramètres avant de pouvoir effectuer des mesures à partir de la reconstitution. En effet, les orientations internes, relatives et externes doivent être calculées pour permettre au modèle d'être fiable et à l'échelle.

Tout d'abord, l'orientation interne est trouvée grâce aux caractéristiques géométriques de l'appareil de prise de vue. Pendant plusieurs années, seuls des appareils photographiques métriques ou semi-métrique étaient utilisés puisque leurs paramètres internes étaient connus et stables (Lanzi, 2009). De nos jours, avec la photogrammétrie assistée par ordinateur, plusieurs logiciels permettent l'utilisation d'appareil photo non métrique. Les paramètres internes de l'appareil ne sont donc pas connus et une phase d'orientation est nécessaire pour y remédier. Pour cela, il faut connaître la valeur de la focale, la position du sommet de prise de vue dans le référentiel topographique et l'orientation de l'appareil photo dans ce même système (Seguin, 2013). Ces paramètres permettent de reproduire le faisceau perspectif 3D et de positionner l'image dans l'espace (Héno, 2019).

Après avoir trouvé l'orientation interne des photos incluses dans la reconstruction, leur orientation relative devra être déterminée. Elle est nécessaire puisqu'elle permet de déterminer la position et l'orientation de deux images l'une par rapport à l'autre, sans se placer dans un plan référentiel de terrain (Seguin, 2013). En d'autres mots, elle vise à donner aux deux faisceaux perspectifs

une position similaire à celle au moment de la prise de vue. Du point de vue géométrique, son but est de déterminer les coordonnées d'un point objet visible sur une image, dans un système de coordonnées précis (Seguin, 2013). Ces inconnues sont déterminées par les principes de colinéarité et coplanarité.

Le principe de colinéarité renvoie au fait que tous les points dans une image peuvent être utilisés pour définir un faisceau qui passe par le centre optique de l'appareil. Il est cependant impossible de déterminer leurs positions exactes sans utiliser le principe de coplanarité qui permet de considérer plusieurs images contenant le même point et de combiner les différents faisceaux perspectifs. L'intersection de ces différents faisceaux permet alors de trouver les coordonnées du point objet. Afin d'effectuer l'orientation relative, il est nécessaire de déterminer les coordonnées d'un minimum de six points homologues présents dans les images afin d'y appliquer ces principes et d'annuler leur parallaxe (Tournadre, 2015 ; Murtiyoso, 2016). En effet, l'utilisation de la théorie de Von Gruber a largement été utilisée et renvoie au fait que les parallaxes sont annulées en tous points dans l'image si les parallaxes de six points sont annulées. De nos jours, le traitement numérique des photographies permet d'utiliser des algorithmes qui détectent automatiquement des milliers de points homologues. Ce traitement résulte d'une image en trois dimensions du terrain photographié. Cependant, l'image a un système de coordonnées arbitraire ou relatif, d'où le nom d'orientation relative.

L'orientation relative permet donc de fixer les images les unes par rapport aux autres à partir de points homologues et sans utiliser de point d'appui. Pour rattacher ces coordonnées arbitraires à un système global et orienter le bloc d'image, l'orientation absolue devra finalement être déterminée. Elle consiste à transformer le système de coordonnées arbitraire ou relatif d'un bloc d'images, vers celui de l'espace objet absolu (Murtiyoso, 2016). Cette transformation met le modèle à l'échelle et vient correctement l'orienter par rapport au terrain. La figure 2-3 démontre graphiquement les étapes comprises dans l'orientation externe d'un projet.

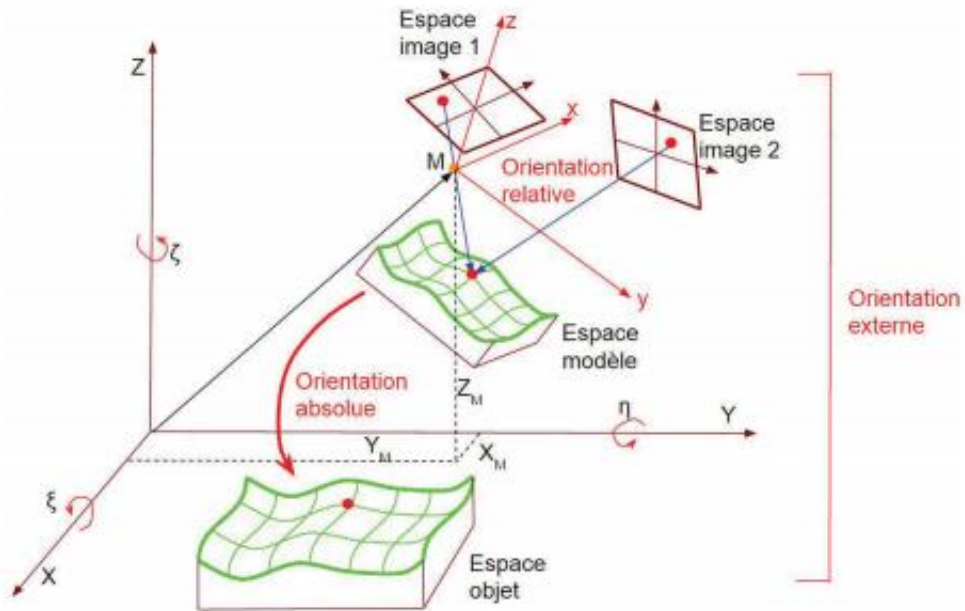


Figure 2-3 : Illustration de l'orientation relative et absolue (Inspiré de Luhmann et al., 2014)

La figure 2-4 schématise un exemple des principales étapes effectuées dans une procédure photogrammétrique, de la prise des données à l'analyse du résultat.

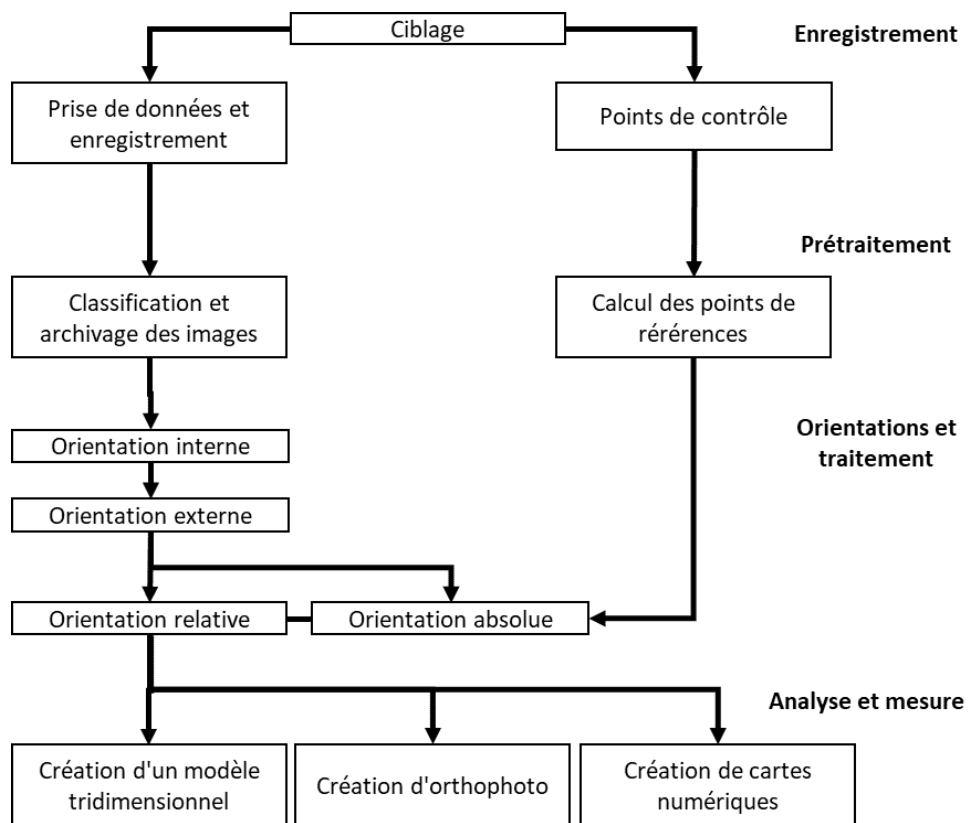


Figure 2-4 : Exemple de schéma d'une procédure photogrammétrique (Inspiré de Luhmann et al., 2014)

La procédure photogrammétrique se divise en quatre phases distinctes soit l'enregistrement, le prétraitement, le traitement et l'analyse des données obtenues (Luhmann et al., 2014). La première étape d'une reconstitution consiste à faire la collecte de données d'une cible préalablement déterminée. Terrestres ou aériennes, ces images devront posséder un certain pourcentage de recouvrement pour avoir des points homologues et ainsi recréer la vision stéréoscopique. Afin d'augmenter la précision du modèle final, la mise en place de points de contrôle peut être intégrée au projet. Ces points ont des coordonnées géographiques connues et mesurées à l'aide de méthodes d'arpentages traditionnelles ou d'autres sources selon la précision désirée. Si les points de contrôle sont utilisés, ils devront être distribués de façon homogène sur la zone d'intérêt pour minimiser l'erreur dans l'échelle et l'orientation du projet. Ainsi, ces points permettent de caler le modèle sur un système de coordonnées connues. La deuxième étape est le prétraitement des données, qui survient après l'enregistrement de terrain. Elle permet de supprimer les mauvaises images et d'archiver les bonnes pour ainsi maximiser la précision du modèle et faciliter son traitement. Le calcul et l'inclusion des coordonnées des points de références sont également inclus dans le prétraitement. Les troisième et quatrième étapes sont celles du traitement et de l'analyse des résultats. Le traitement inclut le calcul des différentes orientations décrites précédemment et la création du modèle tridimensionnel. La dernière étape a pour but la création du modèle d'élévation numérique et d'une orthomosaïque regroupant toutes les images utilisées dans le traitement. Le produit photogrammétrique final sera donc un nuage de points en trois dimensions, une mosaïque fusionnant les images individuelles en une seule image et un modèle d'élévation nous indiquant la hauteur des éléments présents dans l'image par rapport au niveau de la mer. La procédure photogrammétrique de la figure 2-4 peut être appliquée à l'aide d'un moyen de transport piloté ou non. Dans le cadre de cette recherche, nous allons uniquement nous attarder aux systèmes sans pilote et au principe d'estimation de structure par mouvement qui en découle.

2.1.3 Estimation de structure par mouvement

La méthode d'estimation de structure par mouvement (SfM) repose sur le principe d'estimation d'objets en trois dimensions à partir d'une séquence d'images en deux dimensions se chevauchant dans l'espace. Le procédé se base sur la reconnaissance automatique de caractéristiques communes entre images qui permettent d'établir l'orientation de la photo (Micheletti et al., 2015). Bien que semblable à la photogrammétrie traditionnelle, elle se distingue par le fait que les positions et orientations de la caméra sont résolues automatiquement sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des points de contrôle ayant des positionnements tridimensionnels

connus (Westoby et al., 2012). Ces paramètres sont donc déduits à l'aide de procédures d'ajustement itératif effectuées à partir de points de liaisons d'un ensemble de plusieurs images qui se superposent. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour trianguler les emplacements des points superposés et créer un nuage de point en trois dimensions (Cook, 2017). Plus la superposition entre les images est grande, plus la résolution finale sera bonne. Le développement de cette méthode donne l'opportunité d'une acquisition peu coûteuse de données tridimensionnelles comparativement aux techniques traditionnelles. Sa capacité à extraire et créer des données de hautes résolutions, à partir de caméras accessibles à tous, donne un nouvel élan à ce que peut accomplir la photogrammétrie (Micheletti et al., 2015). De plus, la possibilité de fixer ces types d'appareils sur des drones augmente les possibilités et les domaines d'utilisation de cette technique.

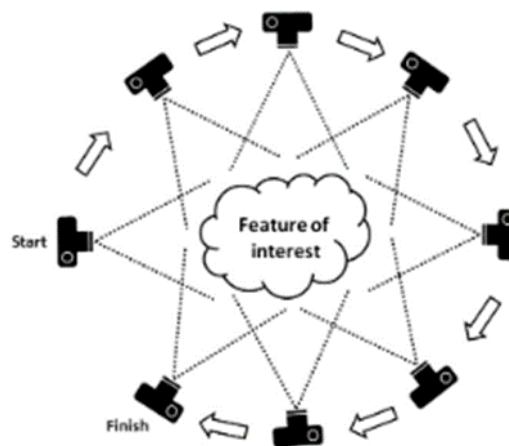


Figure 2-5 : Principe de captage selon le principe d'estimation de structure par mouvement (Westoby et al., 2012)

La figure 2-5 illustre un exemple du principe SfM. Dans cet exemple, les photographies se font autour de la cible d'intérêt. En réalité, et dépendamment de la technique utilisée, les images peuvent être prises autour ou par-dessus de la cible. Elles peuvent également couvrir plusieurs points de vue (nadir et oblique) pour aller chercher plus d'informations et obtenir un meilleur résultat lors du traitement. Le nombre de points de liaison entre les images dépend de la texture de l'objet et de la résolution des images. Logiquement, des images ayant un plus grand recouvrement et une meilleure résolution donneront une qualité supérieure de nuage de points lors du traitement des données (Westoby et al., 2012). La proximité entre la caméra et l'objet photographié bonifie la résolution et améliore également le nuage de point lors de sa création. Les points de liaison doivent au minimum apparaître dans trois photographies pour être pris en compte dans la reconstruction. Pour obtenir un bon modèle, il est donc recommandé de prendre

le plus de photos possibles afin d'optimiser le nombre de points entre les différentes images (Westoby et al., 2012). Auparavant trouvés manuellement, les points de liaisons sont maintenant détectés par des algorithmes qui peuvent en déceler plusieurs milliers par image.

2.1.4 Paramètres du capteur

Le choix des paramètres de la caméra influence la qualité des données lors du captage. Il est important d'avoir la meilleure qualité possible d'image lorsque l'on fait une reconstitution photogrammétrique et donc, les paramètres doivent être ajustés aux conditions d'illumination présentes lors de la collecte de données. La capture d'une image par une caméra numérique se fait par la réflexion de la lumière sur une zone précise. La luminosité de cette scène est ensuite convertie en signal électrique, mesuré et enregistré dans la caméra pour être visionné plus tard (O'Connor et al., 2017). Le champ de vision de la caméra dépend de la distance focale et de la taille du capteur équipé. La distance focale, ou simplement focale, se définit comme étant la distance entre le centre de la lentille et le point de convergence de la lumière sur la lentille (O'Connor et al., 2017). La diminution de la focale augmentera le champ de vision de la caméra. Donc, il est préférable de prendre une petite focale pour photographier une large scène et de prendre une grande focale si le but est de photographier une parcelle précise. Trois autres paramètres sont fondamentaux à déterminer pour obtenir une bonne prise d'images : la vitesse d'obturation, l'ouverture, et l'ISO. La figure 2-6 démontre les trois paramètres et leur effet sur la luminosité de l'image résultante.

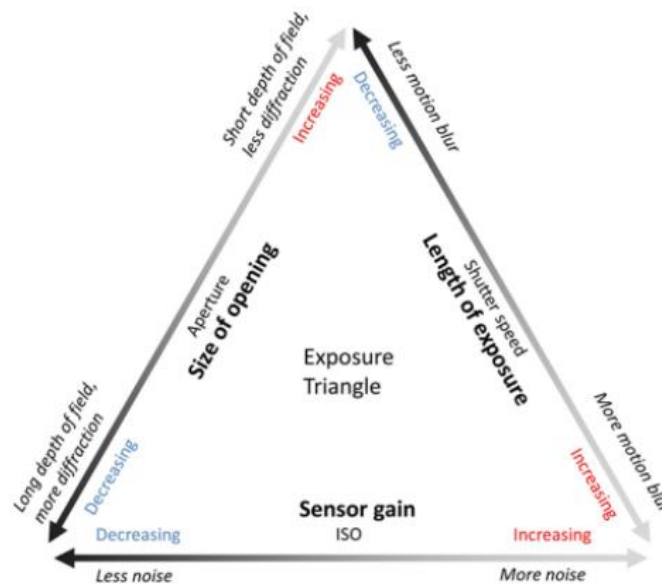


Figure 2-6 : Triangle d'exposition de la capture d'images (O'Connor et al., 2017)

L'ouverture (aperture dans la figure) et la vitesse d'obturation (shutter speed) déterminent la quantité de lumière à laquelle le capteur sera exposé. L'ouverture renvoie au diamètre de l'ouverture du diaphragme lors de la prise de photo par l'appareil. Comme exposé dans la figure 2-6, plus l'ouverture sera grande et plus le capteur sera soumis à la lumière. En conséquence, plus l'ouverture est grande et plus il y aura de diffraction dans l'image. La vitesse d'obturation quant à elle, permet de sélectionner le temps, en seconde, de l'exposition du capteur à la lumière. Logiquement, l'image sera plus claire si l'exposition est élevée et l'image sera plus foncée si le contraire arrive. Pour finir, l'ISO est la sensibilité du capteur qui peut être amplifiée lorsque la luminosité n'est pas convenable. L'augmentation de l'ISO a pour conséquence un gain dans la luminosité de la photo. En revanche, cette augmentation diminue aussi la qualité de l'image en augmentant également le bruit présent. La détermination de ces paramètres est très importante lors d'une prise de photos, d'autant plus si la caméra est en mouvement à bord d'un avion ou même d'un drone.

Plusieurs types d'appareils ont été utilisés et perfectionnés pour l'acquisition d'images. Le satellite et l'avion étaient traditionnellement les moyens efficaces et fiables d'acquérir ce genre de données. Présentement, nous voyons l'apparition du drone comme une plateforme alternative à ces technologies en raison de la récente réduction des coûts d'un appareil et de la disponibilité des capteurs de qualités pouvant être montés sur son armature (Rhee et al., 2018). En plus de la caméra optique, des capteurs hyperspectraux, thermiques, laser (LIDAR) et radar peuvent être montés sur le drone en fonction de l'objet du déploiement. Ces capteurs sont de bonnes alternatives pour suivre certaines problématiques qui requièrent un plus grand éventail d'information que des images prises dans le spectre du visible. Par exemple, elles sont utilisées pour l'agriculture de précision et la cartographie de peuplement végétal afin d'en faire le recensement (Colomina and Molina, 2014). Les capteurs LIDAR (light detection and ranging) mesurent généralement la surface terrestre avec une résolution spatiale très élevée. Ils calculent la différence de temps entre les impulsions lumineuses émises et reçues, et sont capables de reconstituer les altitudes détectées pour construire des modèles d'élévation numérique (Rhee et al, 2018). Finalement, les caméras thermiques sont également de plus en plus communes pour l'acquisition de données. Elles sont entre autres utilisées dans le domaine de la foresterie pour détecter et faire le suivi des feux de forêt (Colomina and Molina, 2014). De nombreuses alternatives de capteurs sont maintenant disponibles et leur miniaturisation facilite l'utilisation sur

des drones. Leur diversité et précision permettent une application dans une quantité de domaines toujours grandissante.

2.2 Système aérien sans pilote

Les systèmes aériens sans pilote, communément appelés drone ou UAV (unmanned aerial vehicle), ont drastiquement évolué au cours des dernières années. L'avancement des technologies liées aux drones et l'augmentation de l'engouement pour ceux-ci ont rapidement fait apparaître des modèles commerciaux abordables pour répondre à cette demande (Gomez et Purdie, 2016). Cette mise en marché a permis le développement non seulement de son potentiel récréatif, mais également scientifique. C'est dans ce contexte que durant les dernières années, plusieurs domaines de recherche ont inclus les drones dans leur méthodologie afin d'exploiter leur potentiel et évaluer l'utilité de cet outil. La polyvalence de leur système et de leur capacité portante permet un grand éventail d'application de terrain qui était auparavant complexe, voire impossible à faire. Il est donc important de relever les avantages et les inconvénients de ces systèmes en plus de survoler les domaines où ils ont eu le plus d'impact.

2.2.1 Types de drones

Le drone peut être défini comme étant un véhicule autonome ou semi-autonome qui est inhabité, télécommandé, réutilisable et pouvant transporter différentes charges utiles le rendant capable d'effectuer de nombreuses tâches spécifiques dans l'atmosphère ou au-delà (Van Blyenburgh, 1999). La documentation fait aussi souvent mention du système d'aviation sans pilote en incluant l'aéronef lui-même, mais également le pilote et la station de contrôle au sol (Eisenbeiss, 2009). Au fil des années et des développements technologiques, l'accessibilité à ces systèmes a augmenté et a permis une plus grande application civile de leurs potentiels. Plusieurs types d'appareils et capteurs ont été développés afin de réaliser des projets qui étaient auparavant plus difficiles à accomplir, lors des débuts de la photographie aérienne. Les premières photographies prises des airs ont été faites vers la fin du 19^e et le début du 20^e siècle. Plusieurs techniques expérimentales ont été testées et utilisées par les scientifiques pour prendre ces images. Les ballons et les cerfs-volants ont été les premiers équipements utilisés pour transporter des caméras et faire de la photographie aérienne sans pilote. En 1889, Arthur Batut sera le premier à prendre des photos chronométrées à partir d'un cerf-volant (Eisenbeiss, 2009). La première image aérienne prise avec un ballon non monté a également été faite en 1889 par Louis Triboulet, qui photographia la ville de Paris (SAME, 1918). Il faudra attendre la deuxième moitié du 20^e

siècle avant de voir apparaître une amélioration des plateformes qui favorisera l’expansion de l’utilisation de la photo aérienne. Plusieurs types d’équipements, terrestres ou aériens, ont été utilisés comme des dirigeables (Zong-jian et Xiao-dong, 2009), des hélicoptères (Dietrich, 2016), des avions et des téléphériques (Cuesta et al., 2013). Même des animaux, comme le pigeon, ont été testés afin de prendre des images en altitudes (Eisenbeiss, 2009). Ces recherches ont été précurseurs puisqu’elles ont permis de prouver l’utilité des drones dans la prise de photo aérienne en ouvrant la possibilité d’avoir un regard nouveau sur le territoire. Elles ont aussi prouvé que les systèmes aériens sans pilote pouvaient être utilisés à différentes altitudes et avec plusieurs systèmes de caméra selon le but recherché dans la collecte d’information (Eisenbeiss, 2009). Le tableau 2-1 montre la classification des types de drones faits par Eisenbeiss. Il délimite les classes de drone en les séparant selon leurs caractéristiques propres.

Tableau 2-1 : Recensement des types de drones et de leurs caractéristiques de propulsion (tiré d’Eisenbeiss, 2009)

		Plus léger que l’air	Plus lourd que l’air		
			Aile souple	Aile fixe	Aile rotative
Non propulsé	Ballon	Deltaplane Parapente Cerf-volant		Planeur	Cerf-Volant à ailes rotatives
Propulsé	Dirigeable	Parapente propulsé		Propulsion à hélices Propulsion à réacteurs	Rotor simple Rotor coaxial Quadrotors Multi-rotors

Les plateformes aéroportées sont séparées en deux catégories, soit celles propulsées par un moteur et celles qui sont propulsées uniquement par le vent ou l'air chaud. Nous pouvons séparer ces deux catégories en quatre classes précisant le type de propulsion : l'air chaud, les ailes flexibles, les ailes fixes et les drones à hélices. Ces classes sont également séparées en sous-classes selon le nombre d'hélices (un, deux, quatre, plus de quatre) ou les types d'ailes présents sur le drone. Les plus répandus sont les systèmes de drone à hélices. Les drones à rotor simple et double possèdent une puissance supérieure aux quads et multi-rotors, ce qui leur permet généralement de soulever une charge plus lourde. Ayant des charges plus petites, les quads et multi-rotors gagnent dans la manœuvrabilité de leurs opérations et dans la facilité de déploiement sur le terrain. En revanche, leur temps d'autonomie est moindre et ils sont plus influencés par les conditions environnementales (Eisenbeiss, 2009).

Les drones à ailes fixes sont généralement propulsés vers l'avant en utilisant des hélices ou un moteur à réaction. La configuration à ailes fixes offre donc une meilleure capacité de portance au drone en plus de mieux résister aux conditions atmosphériques défavorables (Bendea et al., 2008). De plus, les drones à ailes fixes sont aptes à faire des missions de plus longues durées et à couvrir une plus grande superficie entre chaque vol (Eisenbeiss, 2009). Cependant, les drones à rotors multiples sont supérieurs lorsque vient le temps de cartographier des petites zones linéaires ou étroites dues à une meilleure maniabilité (Rusnák et al., 2017). Les plateformes sans moteurs tels que les ballons, les planeurs et les deltaplanes sont contrôlés par des cordes et donc beaucoup plus soumis au vent que les autres systèmes. Les dirigeables sont aussi plus sensibles aux conditions météorologiques. Cependant, ils ont l'avantage de pouvoir rester plus longtemps dans les airs que la majorité des autres plateformes, ce qui leur donne un gain sur les missions à long terme ou sur les travaux qui nécessitent une grande couverture spatiale.

2.2.2 Avantages et limitations des drones

Les images aériennes et satellitaires ont longtemps été les seuls moyens d'obtenir des images vues des airs. L'avènement des systèmes aéroportés sans pilote a permis une diversification de l'offre et des techniques pouvant être utilisées afin d'obtenir des images aériennes de qualité. Ces techniques ont gagné en popularité du fait que les drones viennent combler certaines faiblesses des méthodes traditionnelles. Malgré ces avantages, les drones ne sont pas une solution magique et demeurent un outil complémentaire aux autres techniques de cartographie.

Tableau 2-2 : Tableau synthèse des avantages et des inconvénients des différents moyens de captage

	Avantages	Limitations
Drones	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de formation nécessaire • Déploiement rapide • Peu coûteux • Bonne récurrence temporelle • Très bonne résolution • Utilisé avec plusieurs types de caméras 	<ul style="list-style-type: none"> • Petite zone couverte • Soumis aux conditions météorologiques (vent, température, pluie, etc.) • La qualité fluctue en fonction de la luminosité • Réglementation stricte
Avions	<ul style="list-style-type: none"> • Déploiement rapide • Bonne résolution • Grande surface couverte 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification complexe / disponibilité • Coût de déploiement important • Soumis aux conditions météorologiques
Satellites	<ul style="list-style-type: none"> • Pas soumis aux conditions météorologiques • Grande surface couverte 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible récurrence temporelle • Faible disponibilité • Grand coût d'acquisition • Résolution moindre que le drone ou l'avion

Avantages entourant l'utilisation de drones

La complémentarité des drones s'explique par le fait qu'ils comblent les lacunes des autres moyens de captation. En effet, l'usage des images satellitaires nous communique des informations sur une grande surface terrestre, donc les technologies de télédétection par satellite ont toujours été privilégiées pour le suivi à grande échelle (Adams et Friedland, 2011 ; Rhee et al., 2018 ; Alfredsen et al., 2018). Les désavantages ressortent sur le suivi de petites zones, par exemple les rivières, qui requièrent une bonne résolution spatiale, ce qui n'est pas toujours possible avec les produits dérivés des satellites (Chou et al., 2010 ; Rhee et al., 2018 ; Alfredsen et al., 2018). Les vols peuvent se faire à de très basses altitudes, ce qui améliore la résolution spatiale et permet à l'utilisateur de créer des cartes plus précises des zones en question. Cependant, ces zones seront ponctuelles, puisque les vols ne peuvent généralement pas couvrir d'aussi grandes surfaces qu'une photo aérienne ou satellitaire. Les survols aériens permettent également un déploiement généralement rapide sur les endroits d'intérêt (Chou et al., 2010). En revanche, le degré d'organisation et de planification nécessaire aux survols est grandement supérieur lorsqu'on le compare aux drones. Cette caractéristique donne un avantage aux plateformes aériennes sans pilote qui peuvent être sur le terrain en quelques heures seulement et exécuter plusieurs vols.

La faible récurrence temporelle des satellites est un autre facteur qui limite l'analyse d'événements dynamiques (Rhee et al., 2018 ; Alfredsen et al., 2018), comme les embâcles de

glace. En plus d'obtenir une résolution au centimètre près, les drones peuvent rapidement se déployer sur le terrain et donc couvrir ces événements qui peuvent évoluer rapidement (Chou et al., 2010). La facilité de déploiement fait en sorte que la périodicité entre deux survols peut être très mince. Il y a donc possibilité de faire le suivi de changements rapides, ce qui était difficile ou impossible à faire avec les autres plates-formes (Rhee et al, 2018; Alfredsen et al., 2018). De plus, les coûts de développement, de fonctionnement, de gestion et d'acquisition des images aériennes ou satellitaires sont trop élevés pour de nombreux utilisateurs et minimisent la possibilité de leur exploitation (Rhee et al, 2018). Les drones viennent donc répondre à ce besoin, offrant une plateforme multifonctionnelle et peu coûteuse comparativement aux méthodes traditionnelles.

Le progrès de la technologie a eu pour conséquence de faire baisser les prix des drones, rendant cette plateforme accessible à tous. Ces technologies, avant inaccessibles, sont maintenant disponibles aux utilisateurs qui souhaitent tester l'utilité et le potentiel de la télédétection dans leurs projets ou leurs opérations de tous les jours. Le peu de formation nécessaire et la facilité de contrôle des drones constituent des avantages certains face aux plateformes traditionnelles de captation d'images (Rhee et al, 2018). L'avancement technologique a aussi permis la miniaturisation des capteurs ce qui a largement augmenté leur utilisation sur les drones et a en quelque sorte démocratisé leur utilisation, puisque ces technologies sont maintenant de plus en plus accessibles à tous. Finalement, la disponibilité des satellites et des avions vient aussi compliquer l'acquisition d'image contrairement aux drones qui sont un moyen fiable et toujours disponible après l'achat du matériel nécessaire.

Limitations entourant l'utilisation des drones

Malgré les avancements dans la technologie de captation d'image par drone, certains facteurs sont encore considérés comme des limitations lors des vols. Premièrement, les conditions météorologiques qui deviennent un élément important à considérer dans la planification des campagnes de terrains. La flexibilité de déploiement est limitée par les conditions météorologiques qui pourraient diminuer la qualité des données prises sur le terrain (Eisenbeiss, 2009). La température est une autre limitation qui entoure l'utilisation du drone. En effet, le temps de vol hivernal peut s'avérer diminué en raison de l'impact de la température sur les batteries. Il est donc important de planifier le déploiement en prenant compte de tous ces facteurs et de s'assurer de posséder l'équipement nécessaire. Outre les conditions météorologiques, la luminosité est un autre facteur limitant au bon déroulement d'une prise de données (O'Connor, 2017). En effet, la qualité finale des images recueillies sera influencée par la luminosité ambiante

lors de la sortie de terrain. Les paramètres et la qualité de la caméra joueront donc un grand rôle dans la clarté des images si les conditions de luminosité ne sont pas optimales. En ce qui concerne l'échelle des résultats cartographiques, il est certain que le drone n'est pas pertinent dans toutes les situations. Étant donné son altitude de vol, les zones couvertes lors d'un déploiement sont plus petites que celles d'une cartographie par avion ou satellite, ce qui peut être une limitation pour certaines applications. Finalement, la législation encadrant les drones mise en place le 1^{er} juin 2019 vient également compliquer son utilisation. Cette réglementation concernant le vol de drone balise considérablement son utilisation en zone habitée (Gouvernement du Canada, 2019). Ceci a pour effet d'accroître la difficulté de déploiement en zone urbaine ou en région touchée par une catastrophe naturelle, puisque de nombreuses règles encadrent les vols dans la section III de la partie IX (système d'aéronefs télépilotes) du règlement de l'aviation canadien (RAC).

2.3 Domaines d'activités

Plusieurs domaines de recherche ont bénéficié de l'évolution technologique de la télédétection. À cause de leurs grandes flexibilités, les techniques photogrammétriques dérivées des produits de la télédétection ont un caractère interdisciplinaire. Son utilisation a été popularisée en géomatique puisqu'elle est un moyen économique de réaliser un produit cartographique. En effet, elle est omniprésente dans les domaines de la foresterie (inventaire forestier), du génie (déformation de structure), de l'agriculture (état de santé des cultures), de l'archéologie (cartographie des sites de fouilles), de l'aéronautique (déformation des fuselages), de la criminologie (plan d'une scène de crime), de l'urbanisme (étude de circulation), de l'hydrographie (carte hydrographique) et bien d'autres (Boulianne, 2012). L'apparition des drones et de leurs capteurs ouvre un nouveau marché, les rendant incontournables dans le développement de nouvelles techniques de mesure sur le terrain auparavant seulement disponibles par satellite ou par avion. Que ce soit dans un contexte de recherche ou autre, les drones et leurs capteurs s'implantent comme une alternative fiable et versatile qui gagne en popularité. Ce sont ces caractéristiques qui leur permettent d'être utilisés dans plusieurs domaines comme outil de mesure ou d'aide à la décision. Un domaine tel la gestion des cours d'eau pourrait bénéficier de l'apparition des systèmes aéroportés sans pilote en tant qu'outil de collecte de données. Ciblant des zones extrêmement dynamiques et pouvant évoluer très rapidement, il est essentiel d'être capable de faire un suivi serré et rapide des changements qui peuvent s'y produire. La faible récurrence temporelle des satellites et le coût élevé des survols d'avion est un frein à ce type de suivi. Étant une plateforme à faible coût, facilement déployable dans des zones restreintes et

pouvant donner des produits de haute résolution, les drones viennent répondre à ce besoin. Les images et modèles tirés des drones et de leurs capteurs sont de bons compléments d'information pour posséder une vue d'ensemble du territoire étudié.

2.3.1 Gestion des aléas par drones

Les drones commencent aussi à entrer dans le domaine des catastrophes naturelles et de la gestion des risques par les communautés et gouvernement (Chou et al., 2010). En effet, nous avons vu au cours des dernières années l'explosion de l'utilisation du drone dans un contexte de catastrophe naturelle. De nombreux vidéos amateurs montrant l'ampleur des dégâts sont souvent mis en ligne après des événements d'envergures comme des tornades, des ouragans, des feux de forêt et des inondations. Lors des inondations de 2019, Transport Canada a même interdit les survols en zones inondées à cause du trafic aérien causé par ces engins. Ce NOTAM (Notice to Airmen) a été créé afin de dégager les airs et d'assurer que seuls les organismes de sécurité publique pourront faire l'usage de drones au-dessus de ces secteurs pour la durée de l'avis (Transport Canada, 2019). En plus de l'augmentation de son utilisation récréative, les scientifiques se sont également intéressés aux avantages qu'offrait le drone. La figure 2-7 démontre l'augmentation d'articles scientifiques incluant des drones depuis quelques années. Plus précisément encore, il nous montre l'évolution du nombre d'articles l'incluant dans des recherches ayant pour thème la gestion de risques environnementaux.

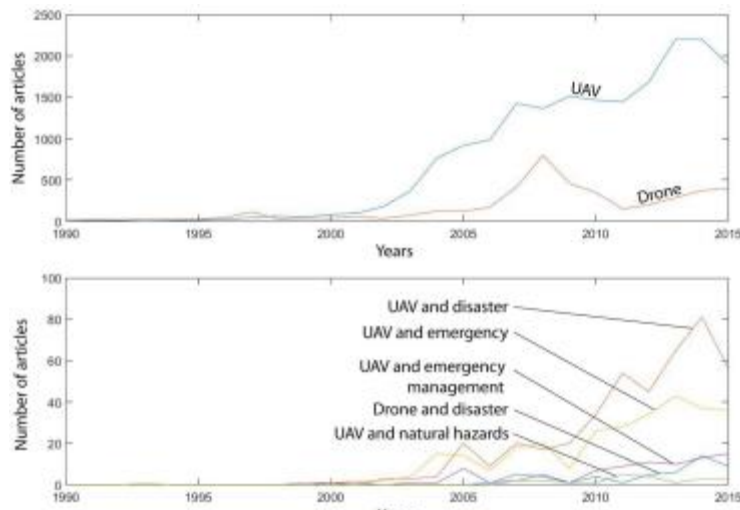


Figure 2-7: Évolution du nombre d'articles incluant les drones en recherche et ayant pour thème la gestion de risques environnementaux (Tiré de Gomez and Purdie, 2016)

Cette croissance prouve que la polyvalence et la facilité d'opération des drones sont grandement utilisées dans ces domaines. Ils permettent d'agir sur un large éventail de problématique, tant en prévention qu'en intervention lors d'événements critiques comme les désastres naturels.

Éruption volcanique

La collecte de données à des endroits difficiles d'accès comme les volcans bénéficie du développement des drones. La versatilité de déploiement donne une liberté à l'utilisateur d'étudier des endroits auparavant dangereux d'accès avec une plus grande fréquence temporelle qu'avec les images satellitaires (Amici et al., 2013). Une surveillance par drone augmente la possibilité de souligner des signes précurseurs pouvant mener à une éruption. Le suivi de la déformation du sol, des anomalies thermiques et des émissions de gaz est essentiel dans la surveillance des zones volcaniques à risques (Amici et al., 2013). En plus des surveillances pouvant être faites quotidiennement, la photogrammétrie peut être utilisée pour estimer les volumes de lave sortants comme mentionnés dans l'étude de Nakano et al (2014). Dans un contexte de formation d'îles par activités volcaniques, la photogrammétrie est utile dans la production de modèles d'élévation numérique avec lesquels il est possible de dériver un calcul de volume. Les drones sont utilisés pour atteindre ces îles difficiles d'approches. L'activité volcanique de certains sites peut alors être suivie de près par les autorités locales en calculant l'étalement des îles volcanique à travers le temps (Nakano et al., 2014).

Glissement de terrain

La gestion et la surveillance des glissements de terrain sont également l'une des applications que peuvent offrir la photogrammétrie et les drones. La création d'orthomosaïques et de modèles d'élévation numérique à plusieurs moments permet de calculer les mouvements des glissements de terrain en comparant les différences de pente et d'autres caractéristiques du terrain. (Marek et al., 2015; Scaioni et al., 2014). Cette technique vient compléter les différentes observations et relevés pouvant être faits sur le site. Elle intervient habituellement pour déceler si le glissement s'est stabilisé ou non, et si la zone est sécuritaire (Marek et al., 2015). Additionnées au modèle numérique d'élévation, les orthomosaïques peuvent servir d'éléments d'analyse dans l'évaluation des glissements de terrain à l'intérieur d'une région difficile d'accès comme mentionné dans Liu et al (2015). De plus, un couplage avec des balayages LIDAR aéroportés peut permettre un meilleur suivi, pour mieux comprendre les processus impliqués lors de ces événements (Scaioni et al., 2014).

Inondation

L'utilisation des drones et de la photogrammétrie est aussi applicable dans la gestion des inondations et de leurs impacts. Ils peuvent être exploités pour donner une vue d'ensemble de l'ampleur de l'inondation en survolant les zones touchées. De plus, la création d'une orthomosaïque peut aider dans la délimitation des zones critiques et améliorer la gestion, l'intervention et la prise de décision des autorités. Plusieurs études démontrent aussi leur pertinence pour faire le suivi des changements de la morphologie, de la topographie et de la végétation riveraine des rivières après un épisode d'inondation (Watanabe and Kawahara, 2016; Langhammer and Vackova, 2018; Izumida et al., 2017). La photogrammétrie et les modèles numériques d'élévation créés à partir du principe SfM permettent de faire des analyses volumétriques des berges et de quantifier l'érosion causée par des événements d'inondation (Izumida et al., 2017). Dans un contexte post inondation, ils peuvent aussi être utilisés pour estimer les dommages matériels et les pertes tangibles des propriétés touchées (Rivas Casado et al., 2018). Les systèmes aériens sans pilote sont donc surtout utilisés pour évaluer les impacts et les dommages causés par ce type d'événement.

Feu de forêt

La surveillance et la gestion des feux de forêt ont été précurseurs lorsque l'on parle de drones en foresterie. En effet, ces champs d'activités ont été les premiers à introduire le drone dans leurs procédures à des fins de reconnaissance et de suivis (Banu et al., 2016). Son utilisation se fait entre autres dans la phase de prévention en survolant les zones potentiellement à risques en plus d'être utilisé en phase d'intervention, pour capter des images qui aident au suivi des feux (Martinez-de Dios et al., 2006). Les survols de zones à risque permettent la détection prématurée des feux. De ce fait, l'intervention peut commencer avant que la situation ne devienne hors de contrôle.

Tremblement de terre

Les drones et la photogrammétrie peuvent être utilisés comme outils de cartographie et d'identification des dommages après sinistre. Ils sont entre autres utiles pour la collecte de données sur des bâtiments affaiblis et non sécuritaires (Gomez and Purdie, 2016; Chou et al., 2010; Adams et Friedland, 2011) L'avantage principal de l'utilisation des systèmes aéroportés sans pilote est la capacité de documenter les dommages sur les infrastructures tout en assurant la sécurité des intervenants (Dominici et al., 2017). La photogrammétrie et la reconstruction en trois dimensions des bâtiments offrent des informations nécessaires pour l'évaluation des dommages. Elle est également un bon point de départ pour établir un plan de reconstruction lors de la dégradation ou de la démolition d'un bâtiment. De plus, la versatilité des drones leur permet

de fournir des données de haute résolution à plusieurs altitudes et points de vue (Dominici et al, 2017). Des drones ont été employés lors des séismes en Haïti pour effectuer des analyses structurelles et au Japon pour déterminer l'efficacité des tentatives de refroidissement du réacteur à Fukushima (Adams and Friedland, 2011).

Érosion côtière

Un sujet d'actualité au Québec est la gestion de l'érosion côtière, qui devient un problème récurrent et engendre des coûts énormes au gouvernement. Le suivi de l'érosion par les vagues ou de l'érosion de bande riveraine peut être amélioré grâce aux modèles photogrammétriques que l'on dérive des images prises par un survol de drone. Les modèles tirés de la photogrammétrie et du principe SfM permettent une cartographie peu coûteuse et efficace qui aide à la gestion de ce phénomène (Gonçalves et Henriques, 2015). En effet, l'avènement de la photogrammétrie comme moyen abordable est devenu une solution dans la cartographie et le suivi de zones côtières prise avec des problématiques d'érosion. Des calculs de volume peuvent être effectués pour faire le suivi de plages ou de bande riveraine afin de déterminer leur degré de dégradation (Gonçalves et Henriques, 2015).

3 Méthodologie

Lors des campagnes de terrain, plusieurs types d'équipement ont été utilisés afin de rencontrer les objectifs de ce projet et tester la méthodologie élaborée. Dans cette section, nous décrivons le matériel ainsi que la méthodologie utilisée afin de répondre aux objectifs fixés.

3.1 Sites étudiés

Les sites de cette recherche ne pouvaient pas être préalablement déterminés en raison de l'incertitude dans la formation d'un embâcle de glace. Nous étions donc en constante communication avec nos partenaires du ministère de la Sécurité publique pour obtenir les informations le plus rapidement possible lors d'un événement. La surveillance se faisait parallèlement avec le système de cartographie en ligne du ministère, nous indiquant les embâcles observés par les conseillers en sécurité civile. En tout, deux sites ont été retenus pour faire des survols : la rivière Saint-François et la rivière L'Acadie.

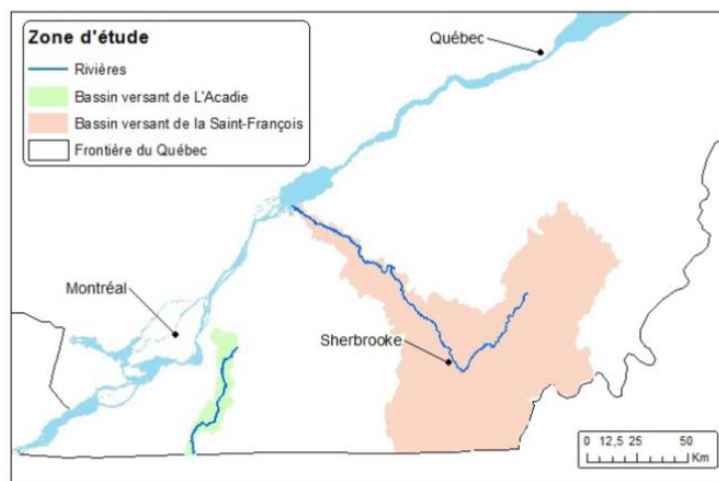


Figure 3-1 : Zone d'étude

Le premier a été un embâcle sur la rivière St-François s'étant formé le 29 janvier 2019 à la confluence de la rivière Massawippi. Située sur la rive sud du Saint-Laurent, la rivière St-François se jette à la hauteur du lac Saint-Pierre après être passée dans les zones de Sherbrooke et Drummondville qui sont les deux agglomérations les plus importantes de son bassin versant. Selon l'historique du ministère de la Sécurité publique, deux embâcles se sont déjà produits dans la même zone en 1994 et 2008 qui n'ont pas causé d'inondation. La présence d'un tributaire, d'un pont et d'îles peuvent être des raisons logiques qui accentuent le risque d'embâcle dans ce secteur. Dans notre cas, l'embâcle a causé des inondations mineures sur les berges qui n'ont

finalement pas menacé le réseau routier et les habitations riveraines avoisinantes. Il s'est consolidé rapidement et a été en place une grande partie de l'hiver. Le déploiement c'est effectué le 7 février 2019.



Figure 3-2: Zone de survol - Rivière Saint François

Le deuxième déploiement a été fait le 26 mars 2019 sur la rivière l'Acadie au croisement avec l'autoroute 10 (km 18). Cette rivière se situe en Montérégie et est un tributaire de la rivière Richelieu à l'embouchure du bassin de Chambly. Trois embâcles ont été recensés à cet endroit dans l'historique du MSP soit en 2001, 2008 et 2011. Le rétrécissement de la rivière à cause du pont de l'autoroute peut être la raison causant les embâcles dans la zone. Celui de 2011 a inondé les champs à proximité et quelques maisons se situant près de la rive. L'embâcle que nous avons survolé était mineur et n'a créé aucune inondation.



Figure 3-3: Zone de survol - Rivière L'Acadie

3.2 Matériels

Plusieurs types de matériel ont été utilisés pour capter les données lors des campagnes de terrain. D'abord, un drone appartenant à l'équipe de télédétection environnementale et nordique (TENOR) de l'INRS a été employé pour survoler les zones d'intérêt. Ensuite, afin de prendre des images de haute qualité, un appareil photo de haute résolution a été installé sur le drone. En plus de l'équipement de vol, une station totale a été utilisée pour prendre des points de validation sur l'embâcle et déterminer la précision du modèle d'élévation numérique produit par le traitement des données. Finalement, les logiciels Pix4d et ArgGIS ont été employés afin d'effectuer le traitement des données en laboratoire.

3.2.1 Drone

Le drone commercial Observer-6 conçu par Kildir a été utilisé. Ce drone a été spécialement développé pour la recherche et permet un déploiement rapide. Son système à multi-rotor lui donne une bonne stabilité, ce qui est essentiel lors de la prise d'images. Robuste et rigide, son cadre en aluminium lui permet de soulever une charge maximum de 2kg. La nacelle accommode différents types de capteurs et peut donc soutenir la caméra Sony a6000. Un drone équivalent avec des caractéristiques semblables aurait pu être utilisé pour la collecte de données. Il n'a donc pas de fonction unique et peut être utilisé dans plusieurs situations dépendamment de l'objectif du déploiement. Le vol peut se faire en configuration manuelle ainsi que par points de contrôles automatisés. Le drone possède un récepteur GPS fonctionnant par mesure de code (pseudodistance) avec boussole intégrée. Le logiciel employé pour planifier les paramètres et les différents tracés est Mission Planner. Il nous donne également les paramètres en temps réel du drone pendant les vols.



Figure 3-4 : Drone Observer 6

Tableau 3-1 : Paramètres généraux du drone

Observer-6	
Dimensions (cm)	86 x 86
Poids	Catégorie: - de 25 kg
Charge maximum	2 kg
Type de caméra	Thermique / RGB / Hyperspectrale
Autonomie	20 minutes
Lien téléométrique	915 MHz bi-directional digital data link
Batteries	Lithium-Polymer 4S-14,8 volts
Portée	1 km

Une procédure de démarrage et de vérification pour le drone Observer-6 a été développée (Annexe 1) pour s'assurer du bon fonctionnement de l'équipement. Cette procédure a été élaborée, testée et peaufinée pour toutes les sorties de terrain et pourra être adaptée sur d'autres types de drones au besoin.

3.2.2 Outil de captage

Les images numériques en ultra-haute résolution spatiale ont été acquises à l'aide d'une caméra RVB Sony a6000 (24,3 MP) installée sur le drone. La caméra était équipée d'une focale de 16 mm qui permet de couvrir une large zone et d'avoir un bon pourcentage de recouvrement entre chaque image.



Figure 3-5 : Caméra Sony a6000

Tableau 3-2 : Paramètres généraux de la caméra

Sony a6000	
Capteur	23,5mm x 15,6 mm. (APS-C)
Résolution	24,3 mégapixels ; 6000 x 4000 pixels
ISO	Auto, 100-25600
Vitesse d'obturation maximale	1/4000 seconde
Objectif	Focale de 16mm

3.2.3 Équipements terrestres



Figure 3-6 : Station totale TX06+

La station totale a été utilisée pour prendre des points de validation sur l'embâcle de glace afin de déterminer le degré de précision de notre MNE. Le mode sans réflecteur de la station a été employé pour prendre les points puisqu'il était impossible d'aller sur l'embâcle avec un prisme. Cette technique nous a permis de calculer la différence de hauteur entre un point de référence pris sur la rive et des points caractéristiques de l'embâcle facilement reconnaissable sur le modèle. Ainsi, une précision du modèle d'élévation numérique a pu être calculée grâce à cette comparaison.

3.3 Méthodologie

Cette section s'attardera tout d'abord à la méthodologie utilisée lors de la création du protocole d'acquisition d'images. Ensuite, le protocole de traitement utilisé pour la création de l'orthomosaïque et du MNE sera expliqué. Elle inclura également la méthodologie utilisée pour le calcul de précision du MNE. Finalement, la technique utilisée pour calculer le volume de glace des embâcles sera décrite.

3.3.1 Protocole d'acquisition d'images haute résolution par drone pour les événements d'embâcles de glace

Pour répondre aux objectifs de ce travail, une stratégie complète de déploiement et de traitement de données a été élaborée. Comme mentionné dans la revue de littérature, il existe déjà des protocoles d'acquisition d'images par drone qui abordent le sujet des risques naturels. Cependant, aucune recherche ne fait mention de la possibilité d'opérationnaliser ces protocoles, et de les inclure comme outil d'aide à la décision dans le cycle de gestion de différents organismes. Garver et al. (2018) nous a démontré qu'il est possible de déployer des drones sur des événements d'embâcles. Cependant, il n'a pas établi la possibilité d'implanter et d'opérationnaliser ce type de déploiement dans un contexte de gestion par les autorités publiques. Le protocole développé dans le cadre de ce mémoire a été spécifiquement créé pour ce genre de situation. Il sera également possible de l'adapter afin de répondre à différents événements qui requièrent l'intervention d'un drone. Il pourra ainsi servir de base pour une éventuelle adaptation de son utilisation à plusieurs domaines et être modulé à plusieurs appareils. Le protocole développé a été inspiré de ceux trouvés dans les différents articles de la revue de littérature (Rusnak et al., 2017; Vazquez-Tarrio, 2017; Amici et al., 2013; Nakano et al., 2014; Marek et al., 2015; Scaioni et al., 2014; Banu et al., 2016; Martinez-de Dios et al., 2006; Dominici et al., 2017; Garver et al., 2018). Cependant, il a été adapté au contexte québécois en prenant compte de différentes législations sur le territoire et de la structure du ministère de la Sécurité publique. Le protocole a également été modelé afin de répondre aux besoins des intervenants lors de la gestion d'embâcles de glace. À la suite de son élaboration théorique, des consultations ont eu lieu avec les différents partenaires impliqués afin de prendre en compte les commentaires et ainsi développer un protocole réaliste, utilisable et ayant des résultats pouvant être pertinents. Il a finalement été testé et amélioré lors des différentes sorties de terrain. Ces sorties ont permis de tester sa faisabilité et d'y ajouter un protocole de préparation du drone et de vérification de l'équipement (Annexe 1). La surveillance des embâcles s'est faite avec la collaboration du ministère de la Sécurité publique. Un suivi était fait chaque jour grâce au site web répertoriant

l'historique des événements d'embâcles au Québec, en plus d'être en communication avec des conseillers en sécurité civile s'occupant de la problématique. Dès qu'un embâcle était localisé, la stratégie de déploiement était lancée dans les meilleurs délais possibles. La section suivante décrira la méthodologie des étapes de la stratégie de déploiement.

La stratégie complète se divise en deux sections : le protocole d'acquisition d'images et le protocole de traitement des données. Ils répondent respectivement aux objectifs 1 et 2 de ce travail. Nous allons d'abord aborder la structure finale du protocole d'acquisition d'images haute résolution. La figure 3-7 nous démontre sa représentation schématique.

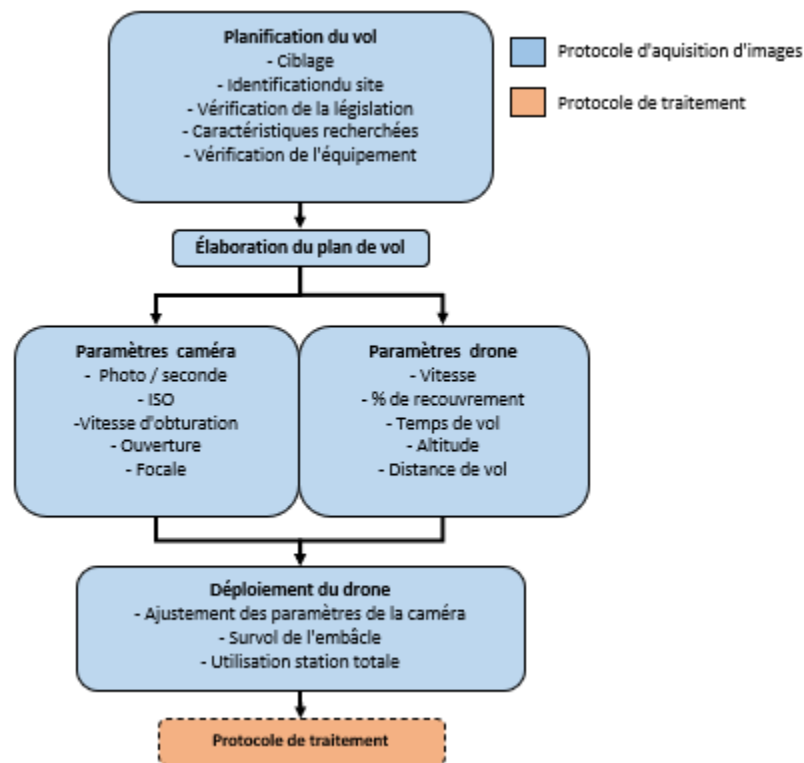


Figure 3-7 : Protocole d'acquisition d'images haute résolution par drone

La planification du vol est une étape essentielle avant le déploiement. Il est d'autant plus important de bien planifier la sortie dans un contexte d'urgence, où plusieurs intervenants peuvent être présents sur la zone d'intérêt. En effet, la présence de plusieurs intervenants sur les lieux d'un embâcle de glace peut compliquer l'opération de captation d'images (restriction de zone par les services d'urgence, présence d'hélicoptère, etc.). Une bonne planification permet donc de minimiser les risques liés au vol de drone et d'optimiser la prise de données. Pour ce faire, plusieurs étapes sont nécessaires et ont été développées dans le protocole de déploiement. Il faut tout d'abord cibler la zone à survoler et l'objet à caractériser.

Une connaissance du milieu est un grand avantage pour déterminer les obstacles à éviter, les accès rapides et les sites de décollage/atterrissage potentiels. Cette reconnaissance peut se faire par ordinateur (images aériennes, Google Earth, les autorités compétentes sur le terrain, etc.). Un bon ciblage et délimitation de la zone d'intérêt facilite les étapes suivantes dans la prise de données. Après avoir procédé à ces étapes préliminaires, l'identification des caractéristiques précises à soustraire des embâcles est important. Dans notre cas, les caractéristiques pertinentes identifiées sont la longueur, la largeur moyenne, le volume de glace, le pied et la tête de l'embâcle. Elles ont été identifiées par le MSP comme des caractéristiques qu'il serait intéressant d'avoir lors de la gestion d'un embâcle. Dans toutes les étapes de planification, il est également important de s'assurer d'effectuer un vol sécuritaire qui respecte les normes et réglementations émises par Transport Canada. Même en utilisant un drone, une certaine distance est nécessaire entre le pilote accrédité et l'embâcle de glace afin d'assurer sa sécurité. Cela peut rendre difficile le vol à vue tel que requis par Transport Canada (Transport Canada, 2019). Il est permis au pilote d'utiliser un système d'aéronef télépiloté sans que ce dernier ou un observateur visuel ne suive l'aéronef en visibilité directe s'il le fait en conformité avec un certificat d'opérations aériennes spécialisées (Transport Canada, 2019). Dans notre cas nous n'avons pas de certificat et donc le vol à vue était notre seule option. La dernière étape avant le déploiement consiste en la vérification du bon fonctionnement de l'équipement.

L'étape suivante du déploiement inclut la création du plan de vol ainsi que la sélection des paramètres du drone et de la caméra. Les plans de vol ont été créés à partir du logiciel Mission Planner. Le logiciel permet de délimiter des polygones de vol et d'y entrer des paramètres précis. Il calculera ensuite le nombre de photos, la résolution spatiale, la distance parcourue par le drone, la dimension des images et le temps de vol nécessaire pour faire le tracé. Ces paramètres donneront un estimé de la magnitude du déploiement. Dans le cas des survols d'embâcles de glace, il faut maintenir un équilibre entre la qualité de l'image pour construire le nuage de points et la durée du vol qui est affectée par la performance de la batterie dans un contexte hivernal.

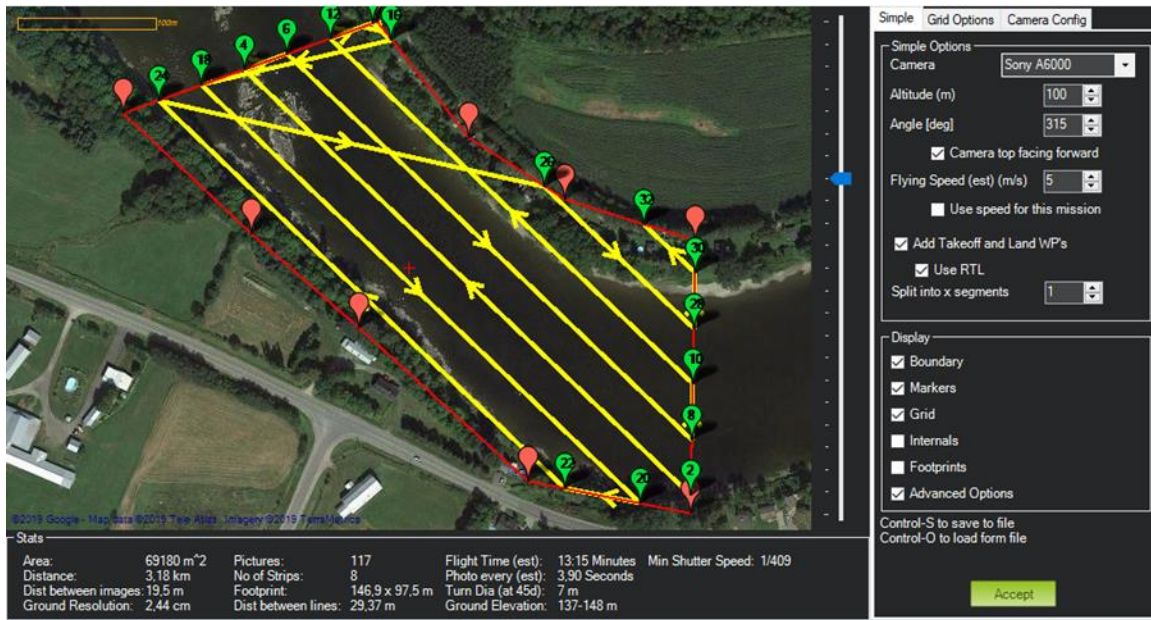


Figure 3-8 : Exemple de survol effectué avec le logiciel Mission Planner

Lors d'une mission incluant la photogrammétrie, les paramètres du capteur et du drone sont essentiels pour obtenir une prise de données de qualité. La résolution des images obtenues est importante puisqu'on veut favoriser des images nettes pour construire le modèle photogramétrique.

Ces paramètres peuvent être déterminés avant le déploiement. Cependant, l'imprévisibilité des conditions peut obliger leurs modifications sur le terrain. Les paramètres du capteur peuvent également être ajustés aux conditions sur le terrain en fonction du degré d'ensoleillement. Pour faire un relevé photogramétrique, il est important d'avoir une bonne précision et de minimiser le bruit lors de la prise d'image. L'ISO, l'ouverture et la vitesse d'obturation sont donc importants à vérifier. La focale utilisée sur l'appareil photo modifiera les caractéristiques des images captées. L'ISO, c'est-à-dire la sensibilité du capteur à la lumière, doit être réglé sur le mode automatique et osciller entre 50 et 1000. L'ISO doit s'ajuster selon les proportions de surface sombre (eau libre) ou claire (glace ou neige) sur la zone photographiée, puisqu'ils peuvent entraîner d'importants contrastes. La vitesse d'obturation doit être fixée pour l'entièreté du vol. Elle doit être élevée (1/500 seconde et plus) pour s'ajuster au drone qui se déplace relativement rapidement. L'ouverture de la lentille (F) doit elle aussi demeurer la même durant tout le vol. Si la valeur du F est trop basse, la photo pourrait donner trop d'importance à des détails en hauteur comme les arbres sur les berges et laisser des zones floues aux alentours. Un F trop grand aurait pour effet de ne pas laisser entrer assez de lumière dans le capteur qui tenterait de compenser en augmentant le ISO, créant ainsi une perte de résolution. Il faut donc trouver un juste équilibre

pour ce paramètre en effectuant plusieurs tests au terrain. En plus du capteur, les éléments de vol sont à considérer et peuvent également être déterminés avant l'arrivée sur le terrain. L'altitude, la distance, le degré de recouvrement latéral et longitudinal, la vitesse et l'approximation du temps de vol sont ceux que nous avons retenus pour effectuer un survol le plus précis possible. L'altitude et le pourcentage de recouvrement entre deux images auront un effet sur la résolution finale du modèle.

L'approximation de la distance parcourue par le drone et sa vitesse permettront de planifier le nombre de vols nécessaire pour couvrir la zone d'intérêt. L'identification du degré de recouvrement est également très importante dans un relevé photogrammétrique de qualité puisque celui-ci établira la proportion commune entre deux images de façons longitudinale (sur la même ligne de vol) et verticale (entre deux lignes de vol). La figure 3-9 démontre un exemple de plan de vol et explique les deux types de recouvrement. Comme en photogrammétrie terrestre, il est important d'avoir un fort recouvrement afin d'obtenir une meilleure reconstruction tridimensionnelle.

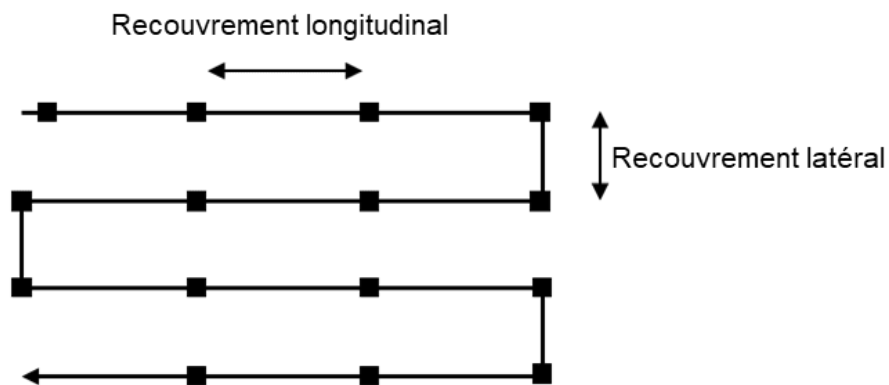


Figure 3-9 : Exemple de recouvrement vertical et longitudinal désiré lors d'un survol de drone

Dans ce cas, un recouvrement latéral entre 70% et 80% a été choisi, avec un recouvrement longitudinal de plus de 90% (1 prise d'image par seconde). Ces niveaux de recouvrement sont comparables aux recouvrements de 80% dans les deux sens de Garver et al. (2018). Les autres paramètres ont été adaptés à chaque site où l'on a déployé le drone pour avoir le meilleur survol possible selon les conditions in situ (ensoleillement, présence de nuage, etc.). Des essais photographiques ont été fait avant le vol pour comparer les résultats de différents réglages de la caméra. À la suite de ces comparaisons, les meilleurs paramètres ont été sélectionnés et le vol a été effectué avec ceux-ci. Finalement, bien qu'ils ne soient pas nécessaires dans toutes les situations, les points de contrôle au sol (GCP) peuvent être utiles dans les cas où le

géoréférencement des images est impossible. Ils devront alors être répartis de manière stratégique (des deux côtés de la rivière). Un récepteur GPS-RTK est l'outil utilisé pour positionner les points de contrôle et déterminer leurs coordonnées, qui serviront au géoréférencement du projet. Dans ce cas, les points de contrôle n'ont pas été utilisés puisque les images étaient géoréférencées.

Le plan de vol ainsi que les paramètres déterminés pour l'appareil photo et le drone seront appliqués durant l'acquisition. Cette préparation permettra de faire voler le drone en mode automatique suivant les coordonnées GPS préalablement déterminées. Si un imprévu survient, il y a possibilité de les modifier pour s'adapter à la réalité du terrain. Des mesures et observations avec la station totale sont effectuées afin de prendre des points de validations sur l'embâcle. Ces points auront pour but d'évaluer la précision du modèle d'élévation numérique.

3.3.2 Création de l'orthomosaïque et du modèle numérique d'élévation par photogrammétrie

Nous utiliserons le protocole de traitement de données développé dans le cadre de la stratégie afin de créer la mosaïque et le modèle numérique d'élévation. Ces étapes seront faites à partir du logiciel Pix4d et dérivées des données prises sur le terrain

Le protocole de traitement vient répondre au deuxième objectif de ce travail. Il permettra de créer une mosaïque d'images et un modèle numérique d'élévation à l'aide de la photogrammétrie et du logiciel Pix4d. La figure 3-10 schématise les étapes de ce protocole. Il a été appliqué aux deux sorties de terrain à l'hiver 2019. Le traitement a été réalisé avec un ordinateur de 32 GB de RAM et possédant la carte graphique Intel UHD Graphics 630. Le système d'opération était Windows 10 (64-bit).

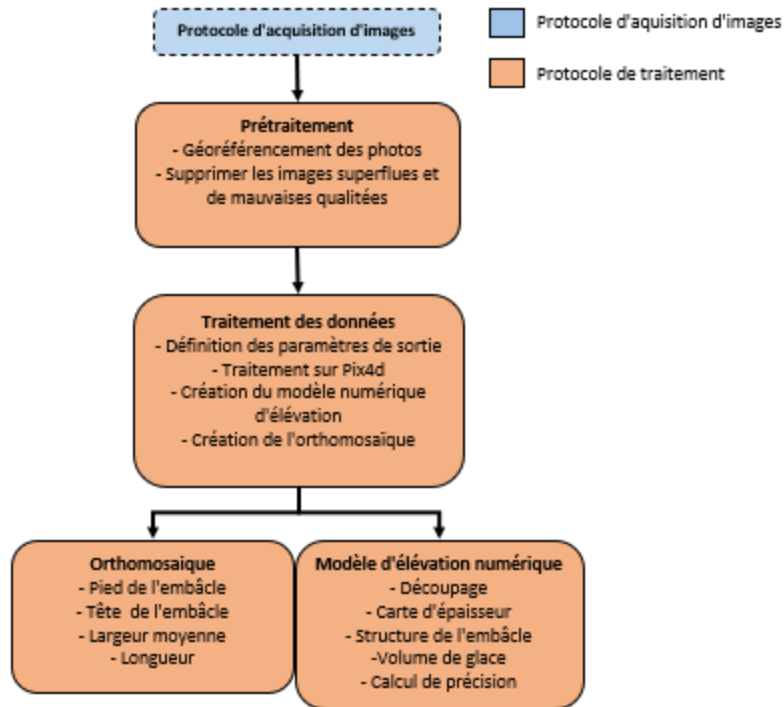


Figure 3-10 : Stratégie de traitement de données

Le protocole est scindé en deux sections distinctes, soit le prétraitement et le traitement des données. Le prétraitement se divise en l'analyse des données brutes et le géoréférencement du projet. Selon les paramètres du capteur et du nombre de vols effectués, il est possible d'avoir un nombre élevé d'images et de données à traiter. Un premier classement est donc nécessaire afin de sélectionner seulement les images pertinentes au traitement. Ce classement a pour but d'observer :

- La couverture générale prise par les images
- La qualité de l'exposition (luminosité)
- Netteté et détails de l'image

Il est important de garder un grand recouvrement entre les photos afin d'avoir un résultat avec une bonne résolution. Le géoréférencement quant à lui se fait dans le but d'associer des coordonnées GPS aux images. Cette association a été effectuée avec la fonction Geotag du logiciel Exiftool. Cette fonction permet d'accorder des coordonnées GPS aux photos, en déterminant la position exacte du drone lors de la capture de l'image. Pour ce faire, les données de vol et position GPS du drone ont été associées aux images avec le logiciel. Chaque image se voit alors donner la position GPS du drone lors de sa capture. À la suite de leur classement et de leur géoréférencement, les images sont importées dans le logiciel Pix4d pour la construction de

l'orthomosaïque et du MNE afin de pouvoir établir les caractéristiques des embâcles survolés. L'enjeu a été la dualité entre le temps de traitement et la résolution. Le logiciel étant capable de traiter les images et de créer des résultats à différentes résolutions, il était intéressant de déterminer les besoins du MSP en ce qui a trait à la précision idéale nécessaire. Pour démontrer la différence, nous avons effectué plusieurs traitements à des résolutions distinctes.

Pix4D est une compagnie suisse spécialisée dans le traitement d'image, qui a réussi à développer une suite de produits logiciels utilisant la photogrammétrie et des algorithmes de vision artificielle. Ce logiciel est capable de transformer des images superposées de plusieurs types en modèle tridimensionnel. L'algorithme utilisé n'est pas disponible, puisque le logiciel est commercial. Cependant, son utilisation est assez facile et permet de bien contrôler le résultat en modifiant le nuage de points ou les paramètres afin d'optimiser le modèle final. Le logiciel Pix4D permet de créer une modélisation 3D de l'embâcle grâce aux photos prises par le drone sur le terrain. Le résultat est sous forme de :

- Nuage de points
- Modèle numérique d'élévation (MNE)
- Image Orthomosaïque

La figure 3-11 démontre les trois étapes de la chaîne de traitement du logiciel.

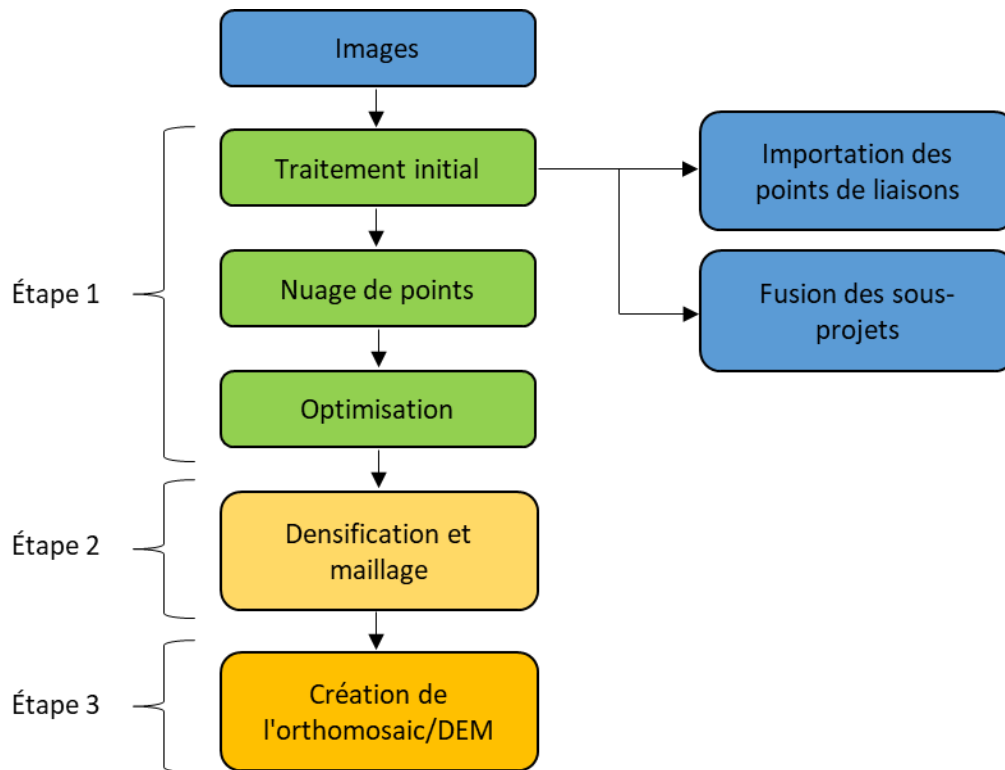


Figure 3-11 : Chaîne de traitement de Pix4D

La chaîne de traitement commence par l'importation des images dans le logiciel qui va déterminer, avec les informations préliminaires comprises dans leur fichier EXIF, un modèle de calibration. Selon le géoréférencement des images, ce modèle peut être aléatoire. Après avoir importé les images et défini les paramètres du projet, la première étape du logiciel est le traitement initial (*initial processing*) dans laquelle les points homologues des images sont détectés et associés pour donner le nuage de point initial. Après le traitement initial, le nuage de point sans densification est disponible afin de faire des vérifications de qualité. L'option « *raycloud* » permet d'ajouter des points de contrôle manuellement ou avec un fichier compatible. Les points de contrôle sont habituellement utilisés lorsque les images importées dans le logiciel ne sont pas géoréférencées. De plus, la fusion des sous-projets se fait à cette étape si le projet d'ensemble a été décomposé pour faciliter la gestion des ressources et accélérer de traitements. La seconde étape est la densification du nuage de points et le maillage 3D (*point cloud and mesh*). Avec la densification du nuage de points, le modèle devient beaucoup plus détaillé et la texture est également améliorée. La dernière étape est la création de l'orthomosaïque et du modèle d'élévation numérique. Le temps de traitement peut varier selon la précision désirée, l'ampleur du projet et la puissance de l'ordinateur.

À la suite de l'obtention du MNE, il a été important de déterminer sa précision pour évaluer le réalisme de la reconstruction. La précision du modèle s'est effectuée en obtenant des points de contrôle à l'aide d'une station totale lors du déploiement. Les points de contrôle sont en fait la différence d'élévation entre un point fixe sur la berge et des points facilement reconnaissables sur l'embâcle de glace. La différence de hauteur entre les points pris avec la station totale a été comparée à la différence des mêmes points obtenus avec le modèle d'élévation numérique.

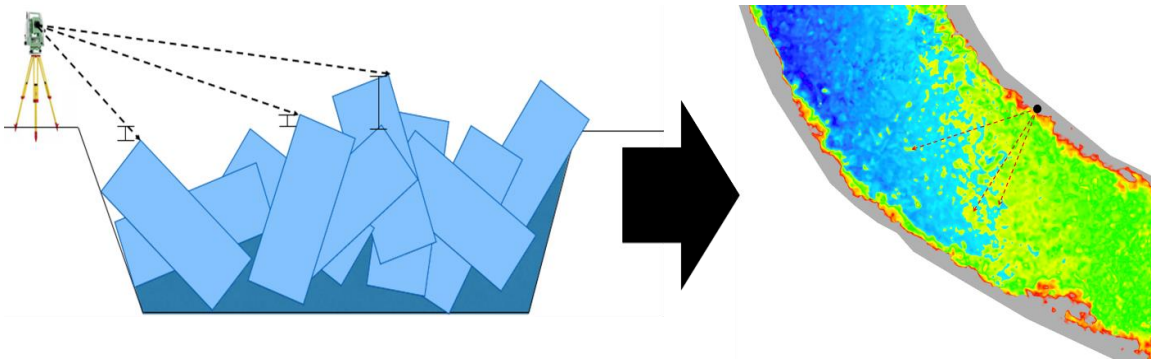


Figure 3-12 : Exemple de comparaison de la différence de hauteur des points de contrôle

La moyenne des différences est alors calculée, ce qui donne la précision globale du modèle. Cette comparaison démontre alors la précision du modèle comparativement à la réalité du terrain que nous avons échantillonné.

3.3.3 Calcul du volume de glace

Le calcul de volume sera fait pour répondre au dernier objectif. Il devra se faire en plusieurs étapes et sera dérivé de l'équation mentionnée par Garver et al (2018). Il nous propose en effet une technique de calcul, utilisée pour approximer le volume de glace présent dans l'embâcle.

Afin d'arriver à faire une approximation la plus précise possible, il faudra d'abord déterminer l'épaisseur de glace sur l'ensemble du tronçon survolé. Pour ce faire, nous utiliserons le modèle numérique d'élévation créé par le principe d'estimation de structure par mouvement. Nous devons ensuite effectuer deux hypothèses. Premièrement, nous devons assumer que l'embâcle est en équilibre isostatique. Ceci renvoie au fait que la capacité de portance de la glace sous l'eau supporte le poids de la glace au-dessus de l'eau à toutes locations. Ensuite, nous supposerons que la glace a une densité de $0,9\text{g} / \text{cm}^3$ et que l'eau a une densité de $1\text{g} / \text{cm}^3$. Si ces conditions sont respectées, l'épaisseur de glace en un point devrait s'exprimer par l'équation:

$$Eg = \frac{De}{De - Dg} \times Ege \quad \text{Eq (3.1)}$$

Où Eg est épaisseur de glace en 1 point en mètre, De est la densité de l'eau, Dg est la densité de la glace et Ege est l'épaisseur de glace au-dessus du niveau de l'eau. Nous utiliserons l'eau courante adjacente à la glace comme hauteur de référence afin d'estimer l'épaisseur supérieure au niveau de l'eau à chaque point. Ensuite, nous allons utiliser l'équation 3.1 pour obtenir l'épaisseur de glace approximative à ce point. Avec cette technique, nous estimerons l'épaisseur sur l'ensemble de l'embâcle. Nous ferons ensuite une interpolation de ces points afin d'obtenir une représentation graphique de la variation d'épaisseur de glace dans l'embâcle.

Le calcul de volume se fera au niveau du pixel de l'image. Donc, le volume de chaque pixel sera calculé et additionné pour donner une approximation du volume de glace totale contenu dans l'embâcle. Pour ce faire, l'outil utilisé a été ArcMap 10.5.1.

$$Vtg = \sum_{i=1}^n a_i \times e_i \quad \text{Eq (3.2)}$$

Où Vtg est le volume total de glace en m^3 , a est l'aire du pixel i , e est l'épaisseur de la glace sous le pixel i et n le nombre total de pixels dans la zone d'intérêt.

Il est aussi pertinent d'effectuer un calcul de l'erreur du volume de glace afin d'identifier le degré de précision de notre calcul de volume initial. La précision du MNE sera déterminé en comparant les données recueillies par la station totale avec les données du MNE et en calculant le biais moyen.

$$Evg = (a \times p) \times n \quad \text{Eq (3.3)}$$

Où Evg est l'erreur dans le volume de glace en m^3 , a est l'air d'un pixel, p est la précision du MNE et n le nombre de pixel

4 Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de la stratégie développée pour les campagnes de terrain sur la rivière L'Acadie et St-François ainsi que son inclusion possible dans le cycle de gestion des embâcles du MSP. De plus, les résultats du calcul du volume de glace seront présentés. Les résultats des deux campagnes de terrain de la session d'hiver 2019 seront mis en valeur. Une discussion sera aussi intégrée afin d'idéaliser quelques recommandations et pistes d'amélioration dans l'éventualité où ce travail serait utilisé comme base dans le développement d'une procédure de déploiement de drones en contexte de catastrophes naturelles au Québec.

4.1 Rivière St-François

Le déploiement sur la rivière St-François s'est effectué le 7 février 2019 afin de survoler un embâcle consolidé s'étant formé à la jonction de la rivière Massawippi le 29 janvier 2019. Au total, de cinq vols ont été effectués pour capter plus de 800 mètres d'embâcle. Celui-ci faisant plusieurs kilomètres, il nous était impossible de le survoler dans son entièreté. L'identification du site et le ciblage se sont faits préalablement au départ. Le respect de la législation a également été vérifié lors de ces étapes préliminaires. De plus, la création des plans de vol s'est faite en laboratoire avec le logiciel Mission Planner. Considérant l'incertitude du temps de vol du drone lors de temps froids, trois différents plans ont été créés. Ils ont été faits dans le but de donner une certaine latitude dans le déploiement et de permettre un réalignement rapide selon le déroulement de la journée. L'équipement a également été vérifié avec le protocole élaboré et mentionné dans l'annexe 1.

4.1.1 Protocole de déploiement et d'acquisition d'images

Considérant l'incertitude dans les paramètres à utiliser pour ce genre de vol, plusieurs tests ont été effectués afin de pouvoir comparer les résultats et utiliser ceux dont le produit est optimal lors des prochaines sorties de terrain. Le tableau 4-1 explique les paramètres du drone utilisés pour chaque vol.

Tableau 4-1 : Paramètres de vol du déploiement sur la rivière St-François

	Altitude (m)	Distance (km)	Recouvrement (%)	Lignes de vol	Vitesse (m/s)	Temps de vol (Min:Sec)
Vol 1	50	2.04	70	8	3	11:20
Vol 2	50	2.04	70	8	6	05:40
Vol 3	100	4.03	70	7	6	11:12
Vol 4	100	2.27	70	7	6	6.18
Vol 5	100	2.27	70	7	6	6.18

Trois vols ont dû être refaits en raison de problèmes techniques. Effectivement, lors des vols 1 et 4, la batterie s’est détachée de son socle, déséquilibrant le drone pour la majorité du temps de vol. Les photos n’étaient donc pas prises au nadir et inutilisables lors du traitement de données. De plus, la caméra s’est éteinte lors du vol 3, alors qu’il restait deux lignes de vol à effectuer. Pour pallier au problème, nous avons recréé un plan de vol en incluant les lignes manquantes et rajoutant une surface non survolée (vols 4 et 5) afin de maximiser le temps de vol.

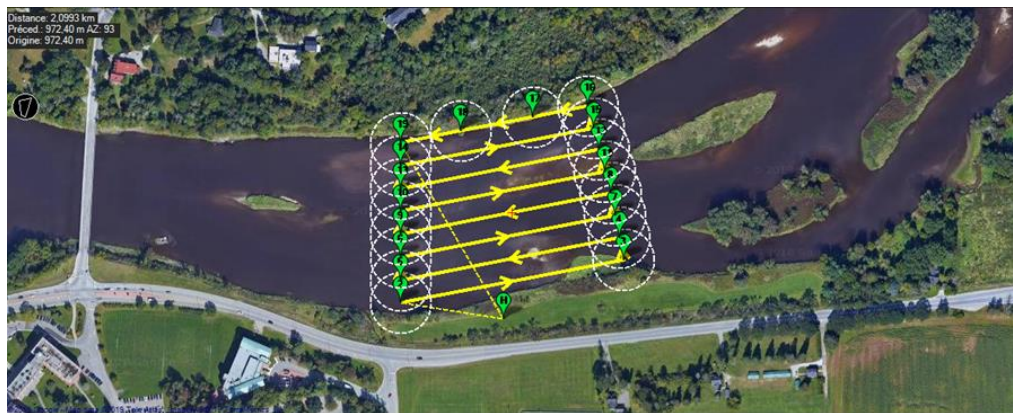


Figure 4-1 : Trajet des vols 1 et 2 sur la rivière St-François

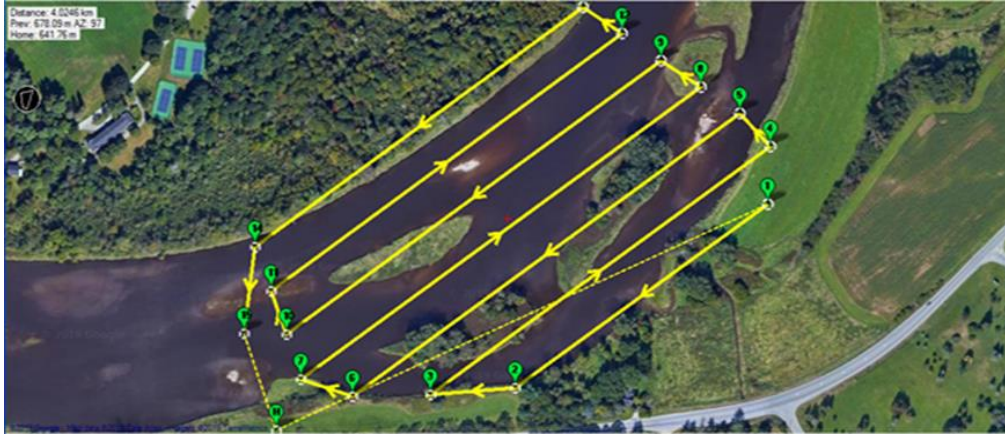


Figure 4-2 : Trajet du vol 3 sur la rivière St-François



Figure 4-3 : Trajet des vols 4 et 5 sur la rivière St-François

Les différents paramètres de la caméra ont été ajustés en fonction des conditions météorologiques le jour du survol, de la lentille à focale fixe de la Sony a6000 et des particularités relatives à la couleur et la texture de l'embâcle. Le couvert de glace recouvert de neige ayant un fort albédo qui réfléchit beaucoup la lumière, on se doit d'optimiser les paramètres afin de maximiser la texture sur l'image résultante.

Ces paramètres ont été sélectionnés afin d'effectuer une reconstruction photogrammétrique de qualité. La sélection de la vitesse d'obturation, de l'ouverture et de l'ISO se sont fait en comparant des photos prises avec des modulation de ces paramètres afin de prendre ceux qui donnent l'image la plus précise selon les conditions météorologiques lors de la prise de données. La focale de 16mm a été sélectionné afin que l'empreinte de l'image couvre un maximum de surface.

- Vitesse d'obturation : 1/800
- 1 photo / seconde
- Ouverture : F5
- Focale : 16mm
- ISO : 500

La planification de vol incluse dans ce protocole a été l'étape la plus complexe à respecter et à exécuter en amont des déploiements. L'identification préalable du site de décollage était difficile en ne connaissant pas le territoire sur lequel le déploiement s'effectuait. L'imagerie satellitaire nous aidait seulement dans une certaine mesure, pour la reconnaissance des zones d'intérêts. En effet, les images étaient dans la majorité des cas prises en été et ne reflétaient pas la réalité du terrain. De ce fait, certaines des zones identifiées préalablement au déploiement n'étaient pas atteignables lors de l'arrivée sur place (présence de neige, inondation, routes impraticables, etc.). La limitation de l'accès à la berge par des terrains privés ou des forêts ajoutait également une difficulté dans le choix d'une zone de décollage sécuritaire. Le choix des endroits de départ s'est finalement réalisé en fonction des caractéristiques présentes à l'arrivée, contrairement à ce qui était prévu initialement. En plus des zones de décollages difficilement identifiables, notre marge de manœuvre pour les vols a été fortement restreinte dû à la législation en place et décrite dans le RAC. Le respect de cette législation limitait les endroits où il était permis de faire voler le drone, il était donc impossible de capturer l'entièreté de l'embâcles. Une solution possible serait d'établir, à l'aide des images satellitaires, un minimum de trois zones de déploiements potentielles et d'effectuer le plan de vol directement sur place.

4.1.2 Stratégie de traitement de données

Le prétraitement s'est effectué sur l'ensemble des photos acquises lors du déploiement. À la suite du géoréférencement, de nombreuses images ont été supprimées pour alléger le traitement final. En grande partie, ce sont les images prises lors du décollage et de l'atterrissage qui doivent être éliminées du traitement. Étant donné le nombre élevé de vols effectués lors de la sortie de terrain, plusieurs combinaisons de traitements ont été faites avec ces différents vols afin d'avoir le résultat

reflétant le mieux la réalité. Déterminer ainsi le meilleur résultat a permis de sélectionner les paramètres optimaux du drone et de la caméra lors des déploiements subséquents. Après analyse, le meilleur résultat a été l'orthomosaïque et le MNE de la combinaison des vols 3 et 5. Le vol 2 a été traité pour voir la différence de résolution entre un vol à 50 et 100 mètres. Le résultat démontre une amélioration de 1,21cm entre les deux vols. Nous avons donc préféré une altitude plus élevée pour sacrifier un minimum de précision afin de diminuer le temps de vol et capter une plus grande surface de l'embâcle en moins de temps. Une comparaison entre le temps de traitement pour obtenir différentes résolutions a aussi été faite afin de proposer au MSP plus d'un résultat avec les mêmes données.

Tableau 4-2 : Temps de traitement des données de la rivière St-François

	Rivière St-François	
Résolution (cm)	2,25	30
Traitement initial	01:52:00	01:01:53
Densification du nuage de points	08:23:12	06:07:02
Maillage 3D	00:30:37	00:25:45
MNE	00:45:42	00:00:48
Orthomosaïque	02:30:14	00:25:39
Total	14:01:45	8:01:07

Comme le démontre le tableau comparatif, le temps de traitement diminue en baissant la résolution finale des résultats. À la suite des rencontres avec le MSP concernant leurs besoins par rapport à ce sujet, il a été déterminé qu'un résultat ayant une meilleure résolution, mais prenant plus de temps de traitement serait privilégié.

Le traitement des données grâce à la technique d'estimation de structure par mouvement permet la création d'une mosaïque d'images et d'un modèle numérique d'élévation. Les caractéristiques des embâcles sont donc dérivées de ces deux produits. Cependant, les caractéristiques obtenues prennent en compte seulement les informations disponibles sur la mosaïque et le MNE. En effet, certaines caractéristiques ont été impossibles à relever lors du traitement de la rivière St-François. Puisque l'embâcle était de plusieurs kilomètres, nous avons été incapables de localiser sur les images le pied, la tête, et de déterminer sa longueur totale. Ceci renvoie aux difficultés de déploiement mentionnées qui nous ont empêchés de survoler l'entièreté de l'embâcle. Cette

situation renforce la pertinence d'utiliser les drones lors d'un embâcle plus petit et pouvant être caractérisé dans son ensemble. La figure 4-4 représente l'orthomosaïque créée par le logiciel pix4d avec les images prises des vols 3 et 5. Sur un total de 1279 images prises lors de ces vols, seulement 856 ont été utilisées. L'entièreté du traitement a duré 14 heures 1 minutes.

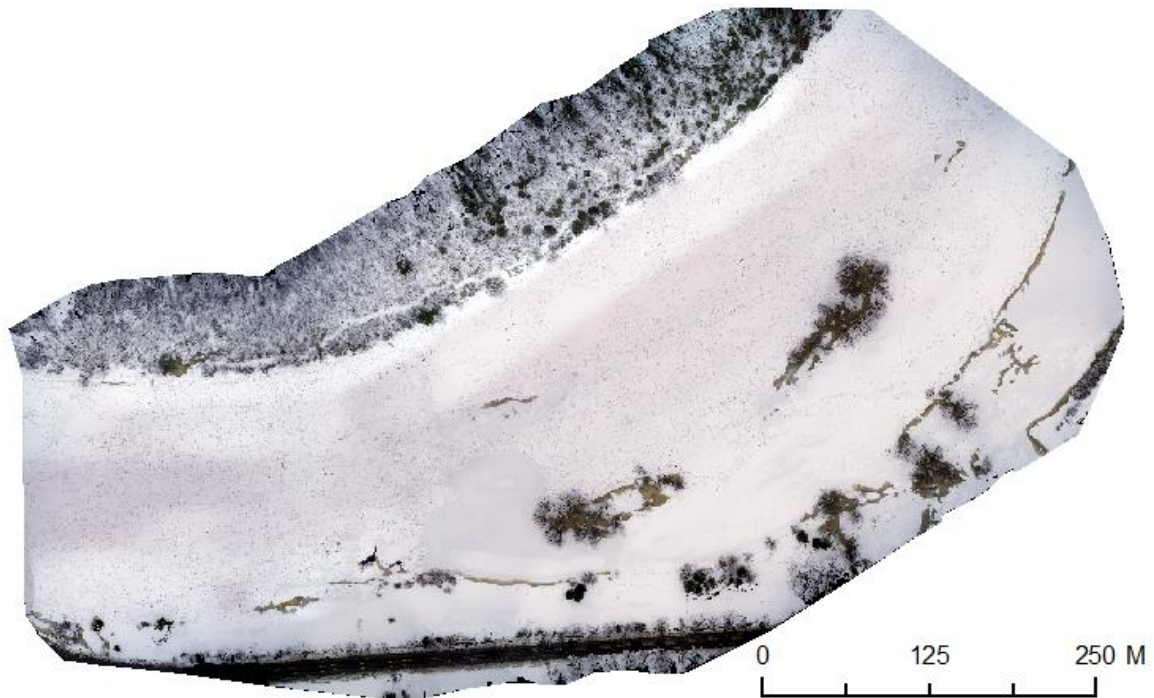


Figure 4-4 : Orthomosaïque des vols 3 et 5 sur la rivière St-François

Tableau 4-3 : Informations complémentaires de l'orthomosaïque de la rivière St-François

	Photo	Distance parcourue (km)	Résolution (cm)	Chevauchement latéral (%)	Temps de vol (min)
St-François	856	6,30	2,25	70	17:30

La mosaïque donne une vue d'ensemble de la section médiane de l'embâcle avec une précision de 2,25 cm. Cette image permet d'observer certaines caractéristiques de la zone où l'embâcle se situe. Une route au bas de l'orthomosaïque peut ainsi être identifiées comme étant à risque dans le cas d'inondations créées par l'embâcle. Nous pouvons voir également la présence d'arbres

dans la rivière et qui nous donne un indice sur l'existence d'îles, facteur qui favorise les embâcles de glace. En plus de ces observations, de l'eau est visible en bordure convexe de la rivière, ce qui pourrait indiquer des endroits déjà inondés. En plus de ces observations, les caractéristiques identifiées au départ peuvent être partiellement calculées grâce à la production de l'orthomosaïque. Le pied n'a pu être localisé dû à la législation en place sur le territoire qui nous empêchait de le survoler. Effectivement, le pied étant à moins de 30 mètres d'un pont, il nous était impossible d'y prendre des images sans contrevenir au règlement sur l'aviation canadienne qui stipule une distance horizontale minimale entre le drone et les passants. Pour sa part, la tête était localisée à plusieurs kilomètres de l'endroit survolé. Il nous était donc impossible de caractériser l'ensemble de l'embâcle en raison de son étendue et du manque d'accès à la berge.

- Longueur survolée : 848,26 mètres
- Largeur moyenne survolée: 213,09 mètres
- Pied de l'embâcle: Indéterminé
- Tête de l'embâcle: Indéterminé

Un modèle numérique d'élévation (figure 4-5) est également créé lors du traitement des données. Il nous permettra de déterminer l'épaisseur de glace et la structure de l'embâcle. L'épaisseur sera éventuellement utilisée dans le calcul de volume.

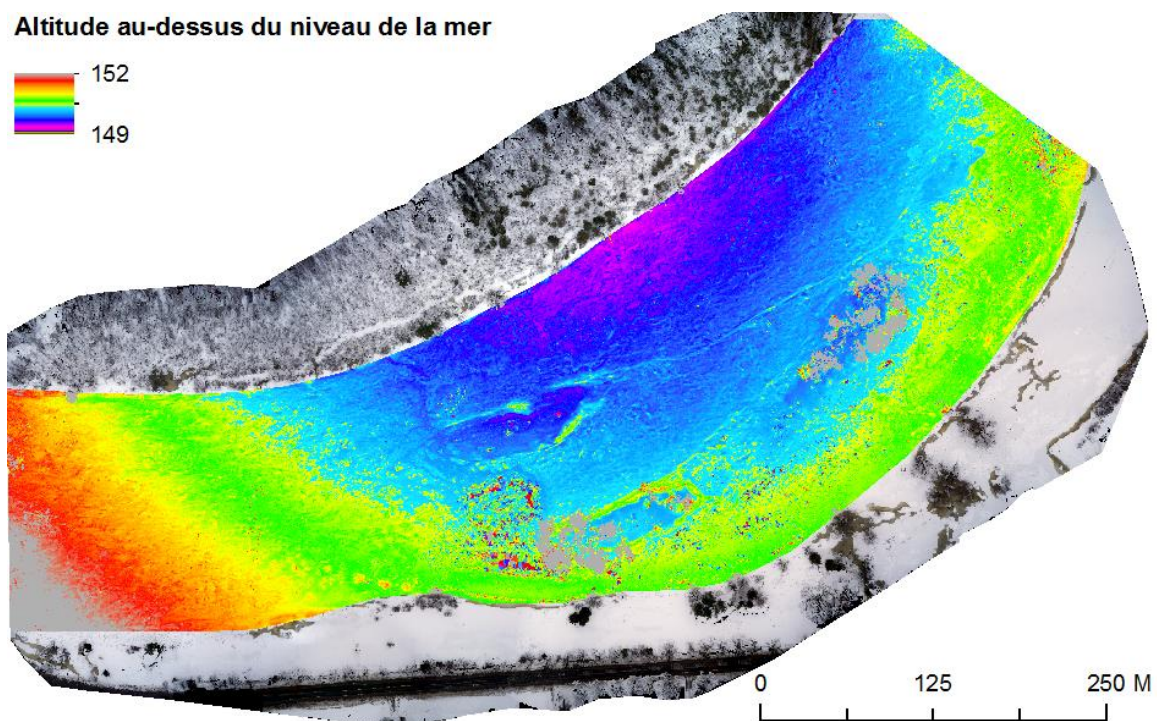


Figure 4-5 : Modèle numérique d'élévation des vols 3 et 5 sur la rivière St-François

Pour le modèle numérique d'élévation, nous avons décidé d'éviter de garder les berges afin de modifier la légende pour exhiber davantage la texture de l'embâcle. Nous pouvons voir une variation d'environ 2 mètres d'altitude le long de la zone photographiée. L'échelle est une altitude absolue en mètre par rapport au niveau moyen des océans. Les zones grises, donc supérieures à 152 mètres par rapport au niveau des océans, sont des arbres enracinés sur des îles et gelés dans l'embâcle. La section gauche du MNE se retrouve également à une altitude supérieure à 152 mètres. Ce résultat pourrait s'expliquer par un manque de constance de recouvrement dans le plan de vol élaboré. En effet, cette section a été tracée manuellement et n'a pas totalement respecté le pourcentage de recouvrement des autres vols. Nous pouvons également constater que les zones plus basses se retrouvent dans la partie concave du méandre. Sa forme peut être expliquée par l'écoulement de l'eau. Elle passerait sous la glace se trouvant dans la courbe convexe de la rivière, ce qui soulèverait légèrement le couvert et expliquerait cette variation d'altitude.

4.1.3 Calcul du volume de glace

Le volume de l'embâcle a été calculé avec l'équation 3-2. Pour utiliser cette équation, nous avons créé une carte d'épaisseur de glace. Cette carte est dérivée de l'équation 3-1 que nous avons utilisée à chaque endroit où l'on pouvait voir de l'eau vive pour un total de 39 points sur l'embâcle. Nous avons donc un résultat approximatif de l'épaisseur à 39 points le long de l'embâcle, L'interpolation de ces points nous donne une carte qui démontre la variation de l'épaisseur de glace sur l'ensemble de l'embâcle.

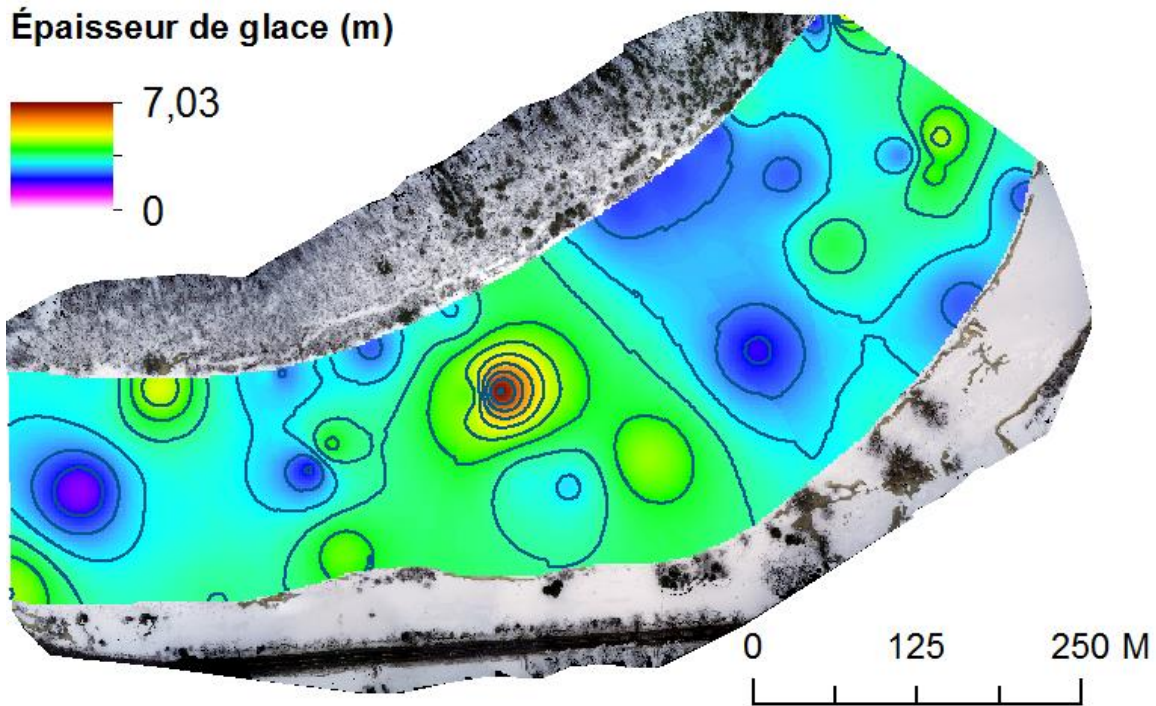


Figure 4-6 : Carte d'épaisseur de glace de l'embâcle sur la rivière St-François

La précision de l'orthomosaïque et du MNE était de 2,5 cm. Avec l'interpolation, nous obtenons une perte d'information sur la carte d'épaisseur puisque la précision passe à 1,8 m. Nous pouvons voir sur la carte une variation d'épaisseur allant jusqu'à environ 7 mètres à un endroit. Cette mesure peut être expliquée par 2 variables. Premièrement, la présence d'une île qui a pu soulever d'avantage la glace lors de la formation de l'embâcle. Coupler avec une poussée glacielle, ceci pourrait expliquer pourquoi l'on retrouve une épaisseur de glace plus grande. De plus, notre hypothèse présume que l'embâcle est en équilibre isostatique et donc que la glace flotte à la surface de l'eau, ce qui n'est pas le cas ici puisque la glace repose directement sur la terre. Deuxièmement, le fait que peu d'eau soit visible dû au recouvrement de l'embâcle par la neige entraîne une grande perte de précision lors de l'interpolation. En ayant un plus grand nombre de points d'estimation d'épaisseur, la précision de l'interpolation aurait augmenté notamment à cet endroit. Ces deux points peuvent expliquer la surestimation de l'épaisseur de l'embâcle dans cette région.

Comme mentionné dans la méthodologie, le calcul de volume se fera au niveau du pixel de l'image. Donc, le volume de chaque pixel sera calculé et additionné pour donner l'approximation du volume de glace totale. Tel que mentionné, à la suite de l'interpolation des points, la résolution

de la carte a été rétrogradée à 1,8 mètres. De plus, la somme de l'épaisseur de chaque pixel contenu dans la carte est calculée et totalise 175 231.96 mètres de glace. L'aire de chaque pixel est donc multipliée par le total de la valeur de l'épaisseur pour nous donner l'approximation du volume de glace dans la section survolée de l'embâcle. Le résultat est de 567 551 m³ de glace.

$$(1.8m)^2 * 175\,231.96m = 567\,751m^3 \quad \text{Eq (4.1)}$$

Il est aussi pertinent d'effectuer un calcul pour déterminer l'erreur dans le calcul du volume de glace. Pendant le déploiement sur la rivière St-François, nous n'avons pas pu utiliser la station totale et déterminer la précision du modèle. Ainsi, afin de déterminer l'erreur du calcul, nous utiliserons la précision trouvée lors du déploiement sur la rivière L'Acadie. L'erreur de notre MNE sera donc de 13,34 cm. Nous utiliserons l'équation 3.3 afin de déterminer l'erreur de notre calcul. Cette équation se divise en deux étapes, soit le calcul de l'erreur en un point et ensuite le calcul sur l'ensemble des pixels de l'embâcle.

$$(1.8m)^2 * 0.1334m = 0.4322m^3 \quad \text{Eq (4.2)}$$

Afin d'estimer l'erreur sur l'ensemble de l'embâcle, nous devons multiplier ce résultat par le nombre de pixel contenu dans la carte d'épaisseur de glace.

$$0.4322m^3 * 53\,344 = 23\,056m^3 \quad \text{Eq (4.3)}$$

Le volume approximatif de glace dans la zone survolée est donc de 567 751,55 m³ de glace avec une erreur de 23 056 m³.

4.2 Rivière L'Acadie

4.2.1 Protocole de déploiement et d'acquisition d'images

La campagne de terrain a été faite le 26 mars 2019 pour déployer le drone sur la rivière L'Acadie à l'intersection de l'autoroute 10, après la formation d'un embâcle le vendredi 22 mars 2019. La vérification du matériel et du drone s'est faite la veille, incluant le chargement des batteries et les tests de fonctionnement mentionné précédemment. En plus du drone, une station totale TS06+ a été utilisée afin de prendre des points de validation sur l'embâcle et déterminer la précision du modèle numérique d'élévation créé lors du traitement. Le plan de vol a été conçu sur place, puisque la localisation exacte de l'embâcle n'était pas encore connue au moment du départ.

Dans ce cas, un seul vol a été nécessaire afin de couvrir l'entièreté de l'embâcle. Nous avons utilisé les paramètres de vol optimaux déterminés à la suite de la sortie précédente sur la rivière Saint-François. Cependant, un plus grand recouvrement a été utilisé puisque la surface couverte était plus petite et que nous voulions un minimum de 4 lignes de vol, afin d'avoir un maximum de photos pour la création de la mosaïque et du modèle numérique d'élévation.

Tableau 4-4 : Paramètres du vol de la rivière L'Acadie

	Altitude (m)	Distance (km)	Recouvrement (%)	Lignes de vol	Vitesse (m/s)	Temps de vol (Min:Sec)
Vol 1	100	0.604	80	4	6	01:04

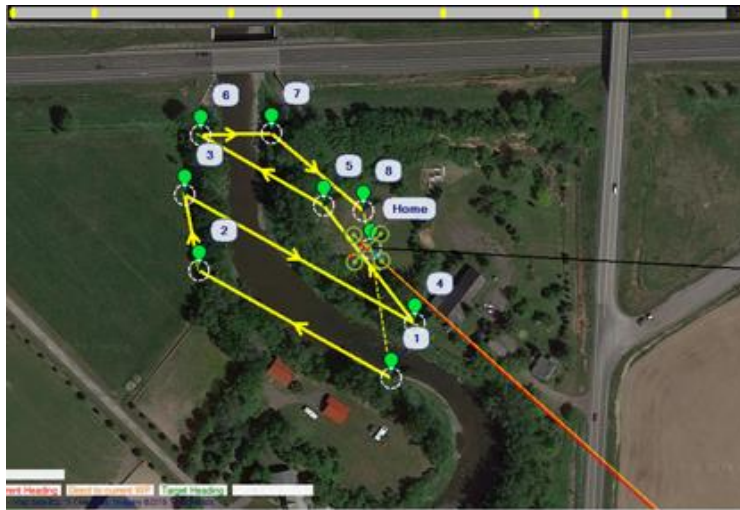


Figure 4-7 : Vol 1 au-dessus de la rivière L'Acadie

Les différents paramètres de la caméra ont été ajustés en fonction des conditions météorologiques le jour du survol, de la lentille à focale fixe de la Sony a6000 et des particularités relatives à la couleur et la texture d'un embâcle. Le couvert de glace ayant un couvert de neige limité comparativement à celui sur la rivière St-François, les mêmes paramètres ne pouvaient être utilisés afin de maximiser la texture sur l'image. De plus, les conditions météorologiques étaient nettement plus ensoleillées, d'où le besoin d'une adaptation constante de l'ISO de la caméra.

Ces paramètres ont été sélectionnés afin d'effectuer une reconstruction photogrammétrique de qualité. La sélection de la vitesse d'obturation, de l'ouverture et de l'ISO se sont fait en comparant des photos prises avec des modulation de ces paramètres afin de prendre ceux qui donnent l'image la plus précise selon les conditions météorologiques lors de la prise de données. La focale de 16mm a été sélectionné afin que l'empreinte de l'image couvre un maximum de surface.

- Vitesse d'obturation : 1/800
- 1 photo / seconde
- Ouverture : F6
- Focale: 16mm
- ISO : Automatique

De plus, la station totale a été utilisée afin de valider la précision du modèle numérique d'élévation. Pour ce faire, dix hauteurs ont été calculées par rapport à une hauteur de référence prise sur la berge. Ces hauteurs ont été comparées à celles obtenues avec le modèle numérique d'élévation pour déterminer sa précision. Les mesures ont toutes été calculées à partir de la différence entre le point de référence (berge) et des points facilement identifiables de l'embâcle. La figure 4-6 démontre la différence entre les résultats de la station totale et ceux obtenus avec les mêmes points, sur le MNE.

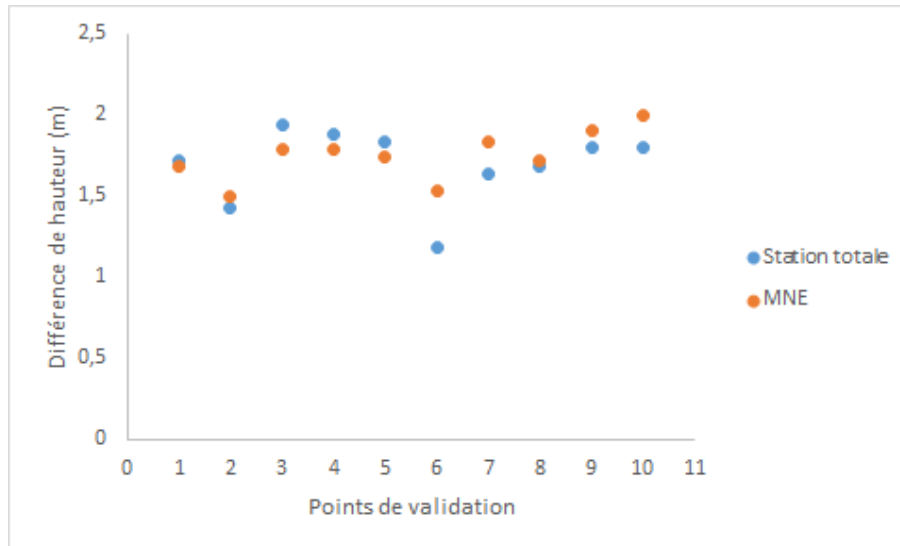


Figure 4-8 : Comparaison de la différence de hauteur des points de validation entre la station totale et le MNE

Cette comparaison nous a permis d'établir une précision du MNE de 13,34 cm. Ce résultat renvoie au fait qu'il y a une marge d'erreur de 13,34 cm entre la réalité de terrain et la reconstruction par le logiciel. La validation du MNE ne s'est effectuée que sur le déploiement de la rivière l'Acadie, puisque la station totale n'était pas disponible lors de la campagne de terrain sur la rivière St-François. L'impossibilité de s'approcher trop près de l'embâcle empêche la prise de mesure directe pour calibrer le modèle. La calibration avec une station totale est un exercice laborieux qui complexifie la création du modèle 3D de l'embâcle. La présence d'un couvert neigeux épais vient parfois masquer les formes et limiter les points de contrôle possibles tant sur le terrain que sur l'image acquise. L'utilisation de la technologie LIDAR à des fins de validation et de calibration pourrait pallier ce problème. Qu'il soit aéroporté sur le même appareil que la caméra optique ou transporté sur les berges de la rivière, le LIDAR demeure une alternative facilement transportable et insensible à la présence de neige.

4.2.2 Protocole de traitement de données

Nous avons également traité les données de la rivière L'Acadie avec le protocole de traitement de données. À la suite du géoréférencement, la mosaïque ainsi que le MNE ont été créés à partir de 212 images sur un total de 293 acquises pendant le vol. Les images de mauvaises qualités et celles de l'atterrissage ont été supprimées pour faciliter la reconstruction de la scène. Le traitement a duré 11 heures 16 minutes. En utilisant les paramètres optimaux de vol et de caméra, nous avons abouti à une résolution de 1,95 cm. L'amélioration de la résolution vient de l'augmentation du recouvrement verticale entre les lignes de vol. En effet, un recouvrement de

80% a été utilisé dû à l'embâcle plus petit que celui sur la rivière St-François. Nous voulions avoir un maximum de ligne de vol survolant l'embâcle et la modification du recouvrement était le paramètre le plus efficace pour y arriver.

Tableau 4-5 : Temps de traitement des données de la rivière L'Acadie

	Rivière L'Acadie	
Résolution (cm)	1,95	30
Traitement initial	06:37:14	03:59:26
Densification du nuage de points	01:12:04	01:03:46
Maillage 3D	00:14:29	00:09:05
MNE	00:15:17	00:00:07
Orthomosaïque	02:56:56	00:09:12
Total	11:16:00	5:21:36

Un comparatif des temps de traitement a également été fait pour les données de la rivière L'Acadie. À la suite des rencontres avec le MSP concernant leurs besoins concernant la résolution, il a été déterminé qu'un résultat ayant une meilleure résolution, mais prenant plus de temps de traitement serait privilégié. Ce sont donc les résultats qui ont été mis de l'avant dans ce mémoire. L'orthomosaïque obtenu à la suite du traitement est démontré à la figure 4-9. Avec cette image, nous pourrions identifier certaines caractéristiques recherchées de l'embâcle.

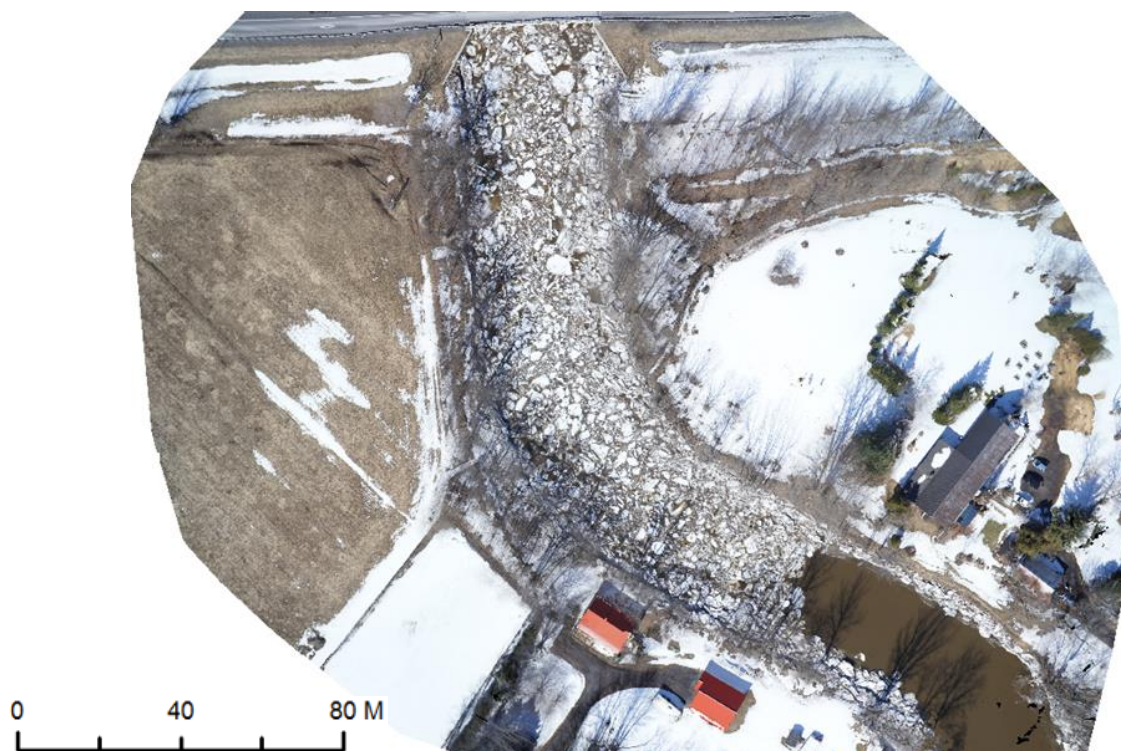


Figure 4-9 : Orthomosaïque de la rivière L'Acadie

Tableau 4-6 : Informations complémentaire de l'orthomosaïque de la rivière L'Acadie

	Photo	Distance parcourue (km)	Résolution (cm)	Recouvrement latéral (%)
L'Acadie	212	0,604	1,95	80

La tête et le pied de l'embâcle sont facilement identifiables sur l'orthomosaïque (Figure 4-9). La largeur moyenne peut être calculée tout au long de l'embâcle ou en tout point à l'aide d'un logiciel de cartographie. La géolocalisation de l'orthomosaïque sur une image aérienne rend possible la compréhension du phénomène ayant causé l'accumulation de glace à un endroit. Dans ce cas-ci, il apparaît clair que le viaduc permettant à l'autoroute de traverser la rivière agit comme obstacle en rétrécissant la largeur du chenal de la rivière.

L'orthomosaïque géolocalisée a permis d'établir que la longueur était de 164,94 m au moment du survol et sa largeur moyenne de 32,57 m. Malgré l'absence d'inondations en amont, on dénote quelques blocs transportés dans l'écoulement qui viendront se joindre à l'embâcle. La structure de l'embâcle n'est pas très compacte et semble laisser beaucoup d'eau circuler sans trop obstruer le débit. L'absence de neige sur la glace accumulée vient confirmer qu'il s'agit d'un embâcle

récent qui ne s'est pas encore consolidé sur place. Tous ces indices témoignent du fait que l'embâcle est actif et que sa surveillance devrait se poursuivre.

- Longueur : 164,94 mètres
- Largeur moyenne : 32,57 mètres
- Pied de l'embâcle: Localiser
- Tête de l'embâcle: Localiser

Un modèle numérique d'élévation est également créé en parallèle de l'orthomosaïque. Il nous permettra de déterminer la structure de l'embâcle et d'y dériver son épaisseur. Cette information sera éventuellement utilisée dans le calcul de volume.

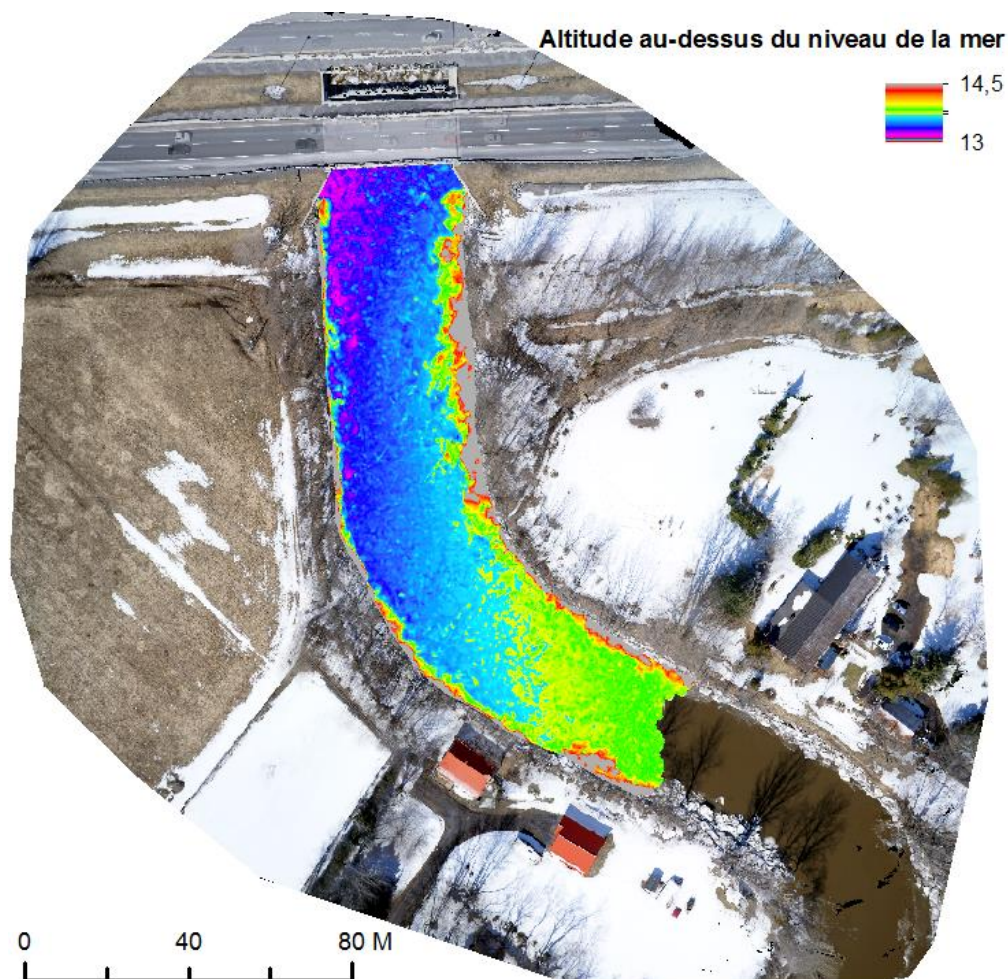


Figure 4-10 : Modèle numérique d'élévation de la rivière L'Acadie

Le modèle numérique d'élévation a également été coupé pour ne garder que la zone d'intérêt de l'embâcle afin de pouvoir ajuster la légende et de maximiser sa texture. En comparant le modèle d'altitude et l'orthomosaïque, il est possible de mieux comprendre la forme de l'embâcle. Bien que l'orthomosaïque donne l'impression que tous les blocs sont à la même hauteur, on note sur le MNE que la hauteur est près de 1,5 mètre plus élevée à la tête de l'embâcle qu'au pied. Le blocage de la glace au niveau du pont qui empêche une circulation normale du débit a pour conséquence une forme classique d'embâcle avec un niveau d'eau plus élevé en amont (Rokaya et al. 2022). L'encaissement très prononcé de la rivière à cet endroit et la présence de morceaux de glace sur la rive expliquent la présence d'altitude élevée sur les bords du modèle. La glace qui recouvre les berges rend difficile de déterminer à quel endroit le chenal se termine lors du découpage de la zone à traiter à partir de l'orthomosaïque. Bien qu'il s'agisse de glace, celle-ci ne fait pas réellement partie de l'embâcle en suspension dans l'eau.

Dans le cas où différents survols sont effectués lors d'un événement, l'évolution de la hauteur d'eau pourrait aussi agir comme indicateur que la situation s'améliore, si les valeurs diminuent, ou qu'elle s'aggrave, si elles augmentent.

4.2.3 Calcul de volume de glace

Finalement, le volume de glace approximatif de l'embâcle a été calculé en utilisant les trois équations mentionnées dans le chapitre précédent. L'épaisseur de l'embâcle a été mesurée en 57 points avec l'équation 3-1. À la suite du traitement photogrammétrique, la précision initiale du MNE était de 1,95 cm pour la rivière L'Acadie. Avec l'interpolation, nous obtenons une perte d'information sur la carte d'épaisseur puisque la précision a diminué à 35 cm. Comparativement à l'embâcle sur la rivière St-François, un plus grand nombre de points a pu être calculé grâce à une plus grande quantité d'eau visible sur l'orthomosaïque. Par conséquent, il y a eu moins de perte d'information lors de l'interpolation des points. La figure 4-11 démontre la variation de l'épaisseur de glace sur l'ensemble de l'embâcle.

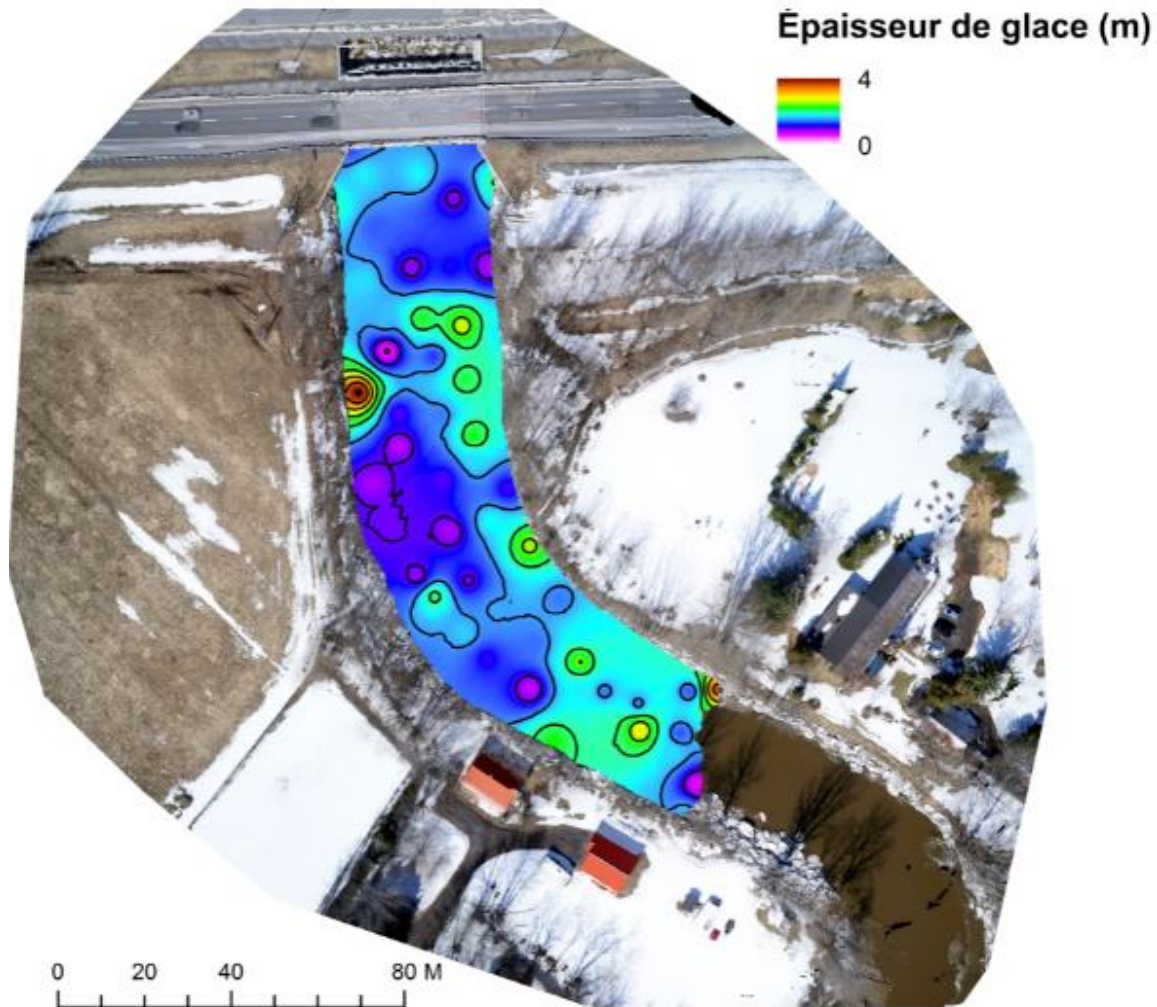


Figure 4-11 : Carte d'épaisseur de glace de l'embâcle sur la rivière L'Acadie

L'interpolation des points a engendré une plus grande perte d'information sur la rivière St-François que sur la rivière L'Acadie. Ce phénomène peut s'expliquer par la température et le nombre de points d'épaisseur calculés avec l'aide du MNE. Le déploiement sur la rivière St-François s'est effectué plusieurs jours après la création de l'embâcle et quelques centimètres de neige sont tombés avant le déploiement. Cette neige a en quelque sorte diminué la quantité de trous d'eau visible que nous avons utilisés pour déterminer l'épaisseur de glace. La moins grande quantité d'eau visible a limité le nombre de point que nous avons calculé et ainsi, malgré la longueur plus imposante de l'embâcle sur la rivière St-François, une moins grande quantité de points a pu être calculée. Il est donc pertinent de faire le déploiement le plus rapidement possible afin d'éviter l'accumulation de neige sur l'embâcle.

Tel que mentionné, à la suite de l'interpolation des points, la résolution de la carte a été rétrogradée à 35 centimètres. La somme de l'épaisseur de chaque pixel contenu dans la carte est calculée et totalise 71 854,88 mètres de glace. L'équation 3-2 est ensuite utilisée pour trouver l'estimation du volume de glace dans l'embâcle. Le résultat est de 8802,22 m³ de glace.

$$(0.35m)^2 * 71\ 854.88m = 8802.22m^3 \quad \text{Eq (4.4)}$$

Comme pour le cas de la rivière St-François, il est important de calculer l'erreur du résultat. La comparaison de la différence de hauteur des points de validation entre la station totale et le MNE (Figure 4-8) nous a permis d'établir une précision du MNE de 13,34 cm. La reconstruction par le logiciel est donc assez fidèle à la réalité terrain. Cette équation se divise également en deux étapes, soit le calcul de l'erreur en un point et ensuite le calcul sur l'ensemble des pixels de l'embâcle.

$$(0.35m)^2 * 0.1334m = 0.01634m^3 \quad \text{Eq (4.5)}$$

Afin de d'estimer l'erreur complète, nous devons multiplier ce résultat par le nombre de pixel contenu dans la carte d'épaisseur de glace de la rivière L'Acadie.

$$0.01634m^3 * 46\ 985 = 767,74m^3 \quad \text{Eq (4.6)}$$

L'embâcle contient donc environ 8802,22 m³ de glace avec une erreur de 767,74 m³.

4.3 Intégration de la stratégie dans la gestion des embâcles par le ministère de la Sécurité publique

L'opérationnalisation des protocoles est la pierre d'assise sur laquelle repose ce travail. En effet, nous devons créer une stratégie fiable et rapide pour minimiser le temps de déploiement, faciliter l'acquisition et le traitement de données pour les futurs utilisateurs. Il est avant tout important de mentionner que le MSP ne possède pas de drone et ce travail est une étude de cas pouvant servir de base dans l'optique qu'éventuellement une acquisition d'équipement soit possible. Cela étant dit, les responsables du MSP peuvent sous-traiter ce type de travail à une entreprise spécialisée. Ce mémoire permet donc d'informer les gestionnaires des types de résultats possibles lors de ce genre de demande. Afin que cette stratégie puisse être interopérable avec celle déjà en place, plusieurs discussions ont eu lieu dans le but de répondre aux besoins de MSP.

Un point soulevé par le MSP a été la pertinence d'un déploiement de drones par rapport à la longueur d'un embâcle. En d'autres mots, jusqu'à quelle longueur est-il réaliste de déployer le drone afin de capter des images d'embâcles. À la suite de nos expériences de terrain, nous pourrions dire qu'il est plus réaliste de caractériser des embâcles de petite taille. Plusieurs raisons expliquent ce raisonnement. Tout d'abord, la problématique d'accès à la berge entre en compte. Un embâcle sur plusieurs kilomètres augmente la chance d'être dans des zones inaccessibles et d'être plus difficile, voire impossible, à survoler dans son ensemble. La législation, qui oblige le vol à vue, restreint grandement la portée d'une zone de décollage. Cette législation empêche également le vol proche des ponts et des habitations qui ceinturent souvent les rivières. Cette contrainte diminue grandement l'efficacité du drone à survoler de grandes zones et entre en conflit avec la caractérisation de grands embâcles. Enfin, la portée d'un drone en vol à vue est d'environ 400 mètres, ce qui veut dire qu'une zone de décollage a une portée d'environ 800 mètres si l'on considère l'amont et l'aval de la zone. Un embâcle de cette envergure ne nécessiterait alors qu'une seule zone de déploiement et faciliterait le captage des données. En plus des règles entourant l'utilisation et le déploiement du drone, la quantité de données joue un rôle dans la pertinence d'un déploiement. Effectivement, le temps de traitement significatif des données acquises lors des survols influence la rapidité de l'obtention du résultat final. Caractériser un embâcle s'étant formé sur plusieurs kilomètres peut s'avérer une tâche énorme en ce qui concerne le temps de traitement. Dans un contexte d'urgence, la rapidité est un facteur clé pour une gestion efficace. Les embâcles de moins grande taille nous permettent donc un déploiement et une acquisition de données plus efficace tout en minimisant le temps de traitement. Nous pouvons prendre comme exemple les deux embâcles survolés dans le cadre de

ce mémoire. L'embâcle sur la rivière St-François s'est avéré impossible à survoler dans son entièreté due aux facteurs énumérés plus haut. En contrepartie, l'embâcle sur la rivière L'Acadie a pu être capté en seulement un vol entre autres en raison de sa longueur.

La figure 4-12 image l'intégration de la méthode de caractérisation d'embâcles de glace à l'intérieur du cycle de gestion des embâcles par le MSP. Ce cycle inclus également les autres volets du projet DAVE qui permettent une meilleure veille et préparation pour ce type d'aléa. Le volet opérationnel se retrouve dans la phase d'intervention du cycle. Ce schéma a été élaboré en collaboration le MSP.

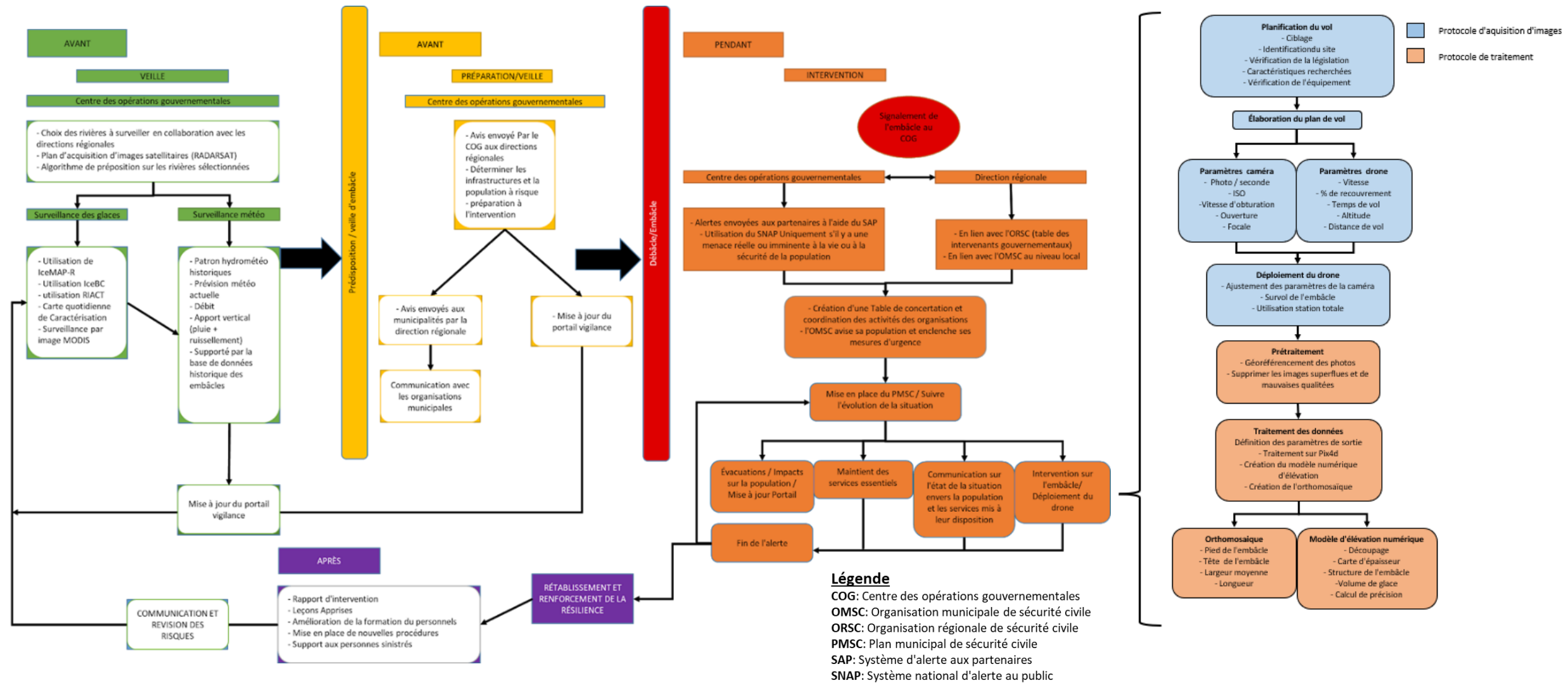


Figure 4-12: Plan intégré de gestion des risques d'embâcles de glace

5 Conclusion

L'augmentation des risques liés aux catastrophes naturelles au cours des dernières décennies met le Québec face à des défis de taille afin d'assurer la santé et la sécurité de sa population. Afin de répondre à ces défis, il est important d'accorder des efforts dans le développement de notre connaissance des risques qui caractérisent le territoire québécois. Les inondations par embâcles de glace font partie de ces aléas récurrents pouvant menacer les infrastructures vulnérables ainsi que la population riveraine. L'amélioration de notre expertise et des méthodes de gestion de ces événements permettront de minimiser leurs impacts et de réduire la vulnérabilité de la population. Ainsi, ce mémoire s'est orienté vers l'étude de l'utilisation de nouvelles technologies dans la gestion des événements d'embâcle de glace. Les résultats ont démontré la possibilité et la faisabilité d'une méthode opérationnelle permettant de caractériser un embâcle à l'aide de la photogrammétrie et d'images prises par drone. En plus de démontrer la pertinence de l'utilisation d'un drone, cette recherche permet également d'améliorer nos connaissances des événements d'embâcles en permettant leur caractérisation rapide et précise. Afin de répondre aux objectifs établis, un protocole de déploiement et de traitement de données a été développé.

La création d'un protocole de déploiement et d'acquisition de données a permis l'établissement d'une base solide à la méthode. Elle permet une captation d'images rapide et de qualité en contexte d'urgence. De plus, l'uniformisation des déploiements et paramètres utilisés a donné lieu à une prise de données de qualité pouvant facilement être sujettes à des traitements photogrammétriques. Elle a cependant été grandement restreinte par le contexte hivernal et les différentes législations en place qui posent des défis supplémentaires dans l'exercice d'un déploiement efficace.

L'élaboration d'un protocole de traitement a permis de créer une suite logique afin d'obtenir une orthomosaïque et un modèle numérique d'élévation fiable. Ces produits se révèlent pertinents dans le cadre d'une gestion d'embâcle. Ils permettent en effet une visualisation d'ensemble du territoire affectée et aident les gestionnaires à soutirer les caractéristiques de l'événement, qui seraient en d'autres temps impossibles à identifier. La fusion des deux protocoles forme une stratégie complète avec laquelle il est possible de dériver le volume approximatif de glace contenue dans la zone survolée. Malgré son approximation, l'information sur le volume et la spatialisation de l'épaisseur devient intéressante dans un contexte où il y a démantèlement d'un embâcle. Avec cette information, une planification de la quantité de glace approximative à enlever

et transporter peut être faite et donc donner un ordre d'idée sur le temps d'intervention requis sur l'embâcle. Des améliorations pourraient en revanche être faites dans le géoréférencement des images et dans le temps de traitement. Il serait pertinent de trouver un moyen de directement géoréférencer les images lors de la prise de photo. Retirer des étapes diminue le risque que des erreurs surviennent. De plus, le déploiement et le traitement devraient s'effectuer sur des embâcles pouvant être survolés dans leur intégralité en mettant l'accent sur la résolution plutôt que le temps de traitement des images. Le temps de traitement pourrait également être grandement amélioré en utilisant ou louant du temps de traitement d'un ordinateur de grande puissance. Ces traitements informatiques peuvent réduire considérablement le temps de traitement ce qui donnerait plus rapidement les résultats finaux aux autorités locales pour les aider dans leur prise de décisions.

Ce mémoire participe donc non seulement à l'avancée de l'utilisation des nouvelles technologies de façon opérationnelle, mais aussi à la gestion de risque des embâcles de glace sur les rivières du Québec. Les résultats de cette recherche permettront aux autorités de posséder une connaissance sur les résultats possibles de ce genre de déploiement dans l'optique où ils se doteraient éventuellement d'une flotte de drone. Une meilleure connaissance sur les caractéristiques et la morphologie des embâcles permet une amélioration des mesures d'urgence prises lors de ces événements. La gestion des embâcles de glace présente un défi. Il est donc important de développer et d'inclure des pratiques pouvant s'incruster dans les opérations des intervenants, et cela, à toutes les échelles. Le travail effectué permet donc d'établir une base dans l'inclusion du drone et de la photogrammétrie dans ces processus afin d'en faire bénéficier tous les acteurs de la sécurité civile. Les embâcles de glace sont des aléas récurrents sur le territoire québécois, qui auront certainement encore des impacts sur la population. L'utilisation de ce travail sur d'autres événements d'embâcle serait donc pertinente afin d'en peaufiner la technique et ainsi d'améliorer la gestion du risque de cet aléa.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Adams S & Friedland C (2011) A Survey of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Usage for Imagery Collection in Disaster Research and Management.
- Alfredsen K, Haas C, Tuhtan JA & Zinke P (2018) Brief Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion, *The Cryosphere*, 12, 627–633, <https://doi.org/10.5194/tc-12-627-2018>
- Amici S, Turci M, Giammanco S, Spampinato L & Giuliotti F (2013) UAV Thermal Infrared Remote Sensing of an Italian Mud Volcano. *Advances in Remote Sensing*. 02. DOI: [10.4236/ars.2013.24038](https://doi.org/10.4236/ars.2013.24038)
- ASPRS (2012) American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *What is ASPRS? – Definition*. <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>
- Banu T, Borlea G & Constantin B (2016) The Use of Drones in Forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*. 5. Doi: [10.17265/2162-5263/2016.11.007](https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007)
- Beltaos S (1995) *River Ice Jams*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado.
- Beltaos, S. et Prowse, T. 2008. River-ice hydrology in a shrinking cryosphere. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7165>.
- Bendea H, Boccoardo P, Dequal S, Giulio Tonolo F, Marenchino D & Piras M (2008) Low cost UAV for post-disaster assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 37.
- Bonn F & Rochon G (1992) *Précis de télédétection volume 1 : Principes et méthodes*. Sillery : Presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.
- Boulianne M (2012) *Photogrammétrie fondamentale*, GMT- 4000. Québec : université Laval, Faculté de foresterie et de géomatique.
- Centre d'histoire de Montréal (s.d) *Embâcle dans le port de Montréal, fin XIXe-début XXe siècle*. <https://ville.montreal.qc.ca/memoiresdesmontrealais/files/embacle-de-glace>
- Chen, Y. & She, Y (2020) Long-term variations of river ice breakup timing across Canada and its response to climate change. *Cold Region Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103091>.
- Chou TY, Yeh ML, Chen YC & Chen YH (2010) Disaster monitoring and management by the unmanned aerial vehicle technology. *Technical Commission VII Symposium 2010*. 38. 137-142.
- Colomina I & Molina P (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92 (2014), pp. 79-97 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Cook KL (2017) An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology* 278:195–208. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009>
- Cuesta F, Lopez-Rodriguez F & Esteban A (2013) A New Blondin System for Surveying and Photogrammetry. *Sensors* (Basel, Switzerland). <https://doi.org/10.3390/s131216894>

- De Munck S (2013) Modèle géospatial de prédisposition des rivières aux embâcles, Mémoire de maîtrise publié. Québec : Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre, Environnement. <https://espace.inrs.ca/id/eprint/1523>
- Dietrich JT (2016) Riverscape mapping with helicopter based structure from motion photogrammetry, *Geomorphology* 252 144–157, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.008>
- Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie. (2009). Concepts de base en sécurité civile. Québec: Sécurité civile Québec.
- Dominici D, Alicandro M & Massimi V (2017) UAV photogrammetry in the post-earthquake scenario: case studies in L'Aquila, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8:1, 87-103, DOI: 10.1080/19475705.2016.1176605.
- Eisenbeiss H (2009) UAV Photogrammetry, Thèse de doctorat publié. Suisse. École polytechnique fédérale de Zurich, Institute of Geodesy and photogrammetry.
- Garver JI, Capovani E & Pokrzwka D (2018) Photogrammetric models from UAS mapping and ice thickness estimated of the 2018 mid-winter Ice jam on the Mohawk River, NY, In: Cockburn, J.M.H., and Garver, J.I., *Proceedings from the 2018 Mohawk Watershed Symposium*, Union College, Schenectady NY, 23 March 2018, v. 10, p. 19-24.
- Gauthier Y, Chokmani K, Raymond S, Decker V, Tolszczuk-Leclerc S, Fortin V & Légaré, S. (2017) DAVE: A geospatial tool to better anticipate ice jams. 19th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Whitehorse, Yukon, Canada.
- Gomez C & Purdie H (2016) UAV- based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring – A Review. *Geoenviron Disasters* 3, 23. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0060-y>
- Gonçalves JA & Henriques R (2015) UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 104, Pages 101-111, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>.
- Gouvernement du Canada, CCCOT (2015) Notions fondamentales de télédétection – Introduction. <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/introduction/9364>
- Gouvernement du Canada, Sécurité Publique Canada (2019) Stratégie de sécurité civile pour le Canada. <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/mrgncy-mngmnt-strtg/mrgncy-mngmnt-strtg-fr.pdf>
- Gouvernement du Canada, Transport Canada (2019) Arrêté d'urgence visant les zones inondées. Transport Canada. <https://tc.canada.ca/fr/arrete-urgence-visant-zones-inondees>
- Gouvernement du Canada, Transport Canada (2019) Règlement de l'aviation canadien, Partie IX — Systèmes d'aéronefs télépilotés. Transport Canada. <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-96-433/TexteComple.html#s-900.01>
- Héno R (2019) Cours de photogrammétrie analogique. École Nationale des Science Géographiques, Bibliothèque de ressources pédagogiques de l'ENSG.
- Henry J-B (1999) Cours de topographie et topométrie générale – Chapitre 4 : les méthodes indirectes. France : Université Louis-Pasteur Strasbourg. École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST).
- Izumida A, Uchiyama S & Sugai T (2017) Application of UAV-SfM photogrammetry and aerial lidar to a disastrous flood: repeated topographic measurement of a newly formed crevasse

- splay of the Kinu River, central Japan, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1505–1519, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1505-2017>, 2017.
- Konecny G (1985) The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - 75 Years Old, or 75 Years Young. Keynote Address, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(7), pp. 919-933.
- Langhammer J, Vacková T (2018) Detection and Mapping of the Geomorphic Effects of Flooding Using UAV Photogrammetry. *Pure and Applied Geophysics*. **175**, 3223–3245 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1874-1>
- Lanzi L (2009) La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences forensiques, Thèse de doctorat publiée. Suisse : Université de Lausanne, Faculté de Droit et des Sciences Criminelles.
- Liu CC, Chen PL, Matsuo T & Chen CY (2015) Rapidly responding to landslides and debris flow events using a low-cost unmanned aerial vehicle. *Journal of Applied Remote Sensing*. 9. 096016. Doi : 10.1117/1.JRS.9.096016.
- Tournadre V (2015) Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère, application au suivi d'évolution de digues, Thèse de doctorat publiée. France : Université Paris-Est Marne-la-Vallée, École Nationale des Sciences Géographiques.
- Luhmann T, Robson S, Kyle S, Boehm J (2014) Close-range Photogrammetry and 3D Imaging edition 2. De Gruyter, 684 p.
- Madaeni F, Chokmani K, Homayouni S, Lhissou R, Gauthier Y & Tolszczuk-Leclerc S (2019) Hydro-meteorological pattern recognition of ice jam formation. Communication in the 20th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Ottawa.
- Marek L, Miřijovský J, Tucek P (2015) Monitoring of the Shallow Landslide Using UAV Photogrammetry and Geodetic Measurements. *Engineering Geology for society and Territory – Volume 2*. Springer, Cham. p 113-116. Doi: 10.1007/978-3-319-09057-3_8.
- Martinez-De-Dios JR, Merino L, Caballero F, Ollero A & Viegas DX (2006) Experimental results of automatic fire detection and monitoring with UAVs. *Forest Ecology and Management*, 234.
- Micheletti N, Chandler JH & Lane SN (2015) Structure from motion (SfM) photogrammetry. IN: Clarke, L.E. and Nield, J.M.(Eds.) *Geomorphological Techniques (Online Edition)*. London: British Society for Geomorphology. ISSN: 2047-0371, Chap. 2, Sec. 2.2.
- Morse B, Turcotte B (2018) Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (volet a) <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportMorse2018.pdf>
- Murtiyoso A (2016) Protocole d'acquisition d'images et de traitement des données par drone – Modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie, Mémoire de maîtrise publié. Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg.
- Nakano T, Kamiya I, Tobita M, Iwahashi J & Nakajima H (2014) Landform monitoring in active volcano by UAV and SfM-MVS technique. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XL-8. 10.5194/isprsarchives-XL-8-71-2014.

- O'Connor J, Smith MJ & James MR (2017) Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 41(3):325-344
- Prowse, T. D., Bonsal, B. R., Duguay, C.R., Lacroix M. P. 2017. River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*. <https://doi.org/10.3189/172756407782871431>.
- Rhee DS, Kim YD, Kang B & Kim D (2018) Applications of unmanned aerial vehicles in fluvial remote sensing: An overview of recent achievements. *KSCE J Civ Eng* 22, 588–602 <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1862-5>
- Rivas Casado M, Irvine T, Johnson S, Palma M & Leinster P (2018) The Use of Unmanned Aerial Vehicles to Estimate Direct Tangible Losses to Residential Properties from Flood Events: A Case Study of Cockermouth Following the Desmond Storm. *Remote Sens.* 10, 1548. <https://doi.org/10.3390/rs10101548>
- Rokaya P, Lindensmith K, Pietroniro A et Clark M. 2022. Modelling of ice jam floods under past and future climates: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589915522000025#f0005>
- Rusnák M, Sládek J, Kidová A & Lehotský M (2017) Template for high-resolution river landscape mapping using UAV technology. *Measurement*, volume 115, p. 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.023>.
- SAME (1918) Society of military Engineers, Corps of Engineers, United States Army, and Engineer Department at Large, Vol. 10, No. 54, pp. 855-884
- Scaioni M, Feng T, Lu P, Qiao G, Tong X, Li R, Barazzetti L, Previtali M & Roncella R (2015) Close-Range Photogrammetric Techniques for Deformation Measurement: Applications to Landslides. In: Scaioni M. (eds) *Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction*. Springer Natural Hazards. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45931-7_2
- Schenk T (2005) Introduction to photogrammetry, GS400.02. États-Unis: The Ohio State University, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science.
- Seguin M (2013) Photogrammétrie numérique et architecture : apport et application de la corrélation épipolaire dense à l'archéologie du bâti. Mémoire de maîtrise publié, Aix-Marseille Université, Département d'Histoire de l'Art et d'Archéologie.
- Tournadre V (2015) Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère, application au suivi d'évolution de digues, Thèse de doctorat publié. Paris : Université Paris-Est Marne-la-Vallée, École Nationale des Sciences Géographiques.
- Turcotte B (2017) Le risque d'inondation par embâcles de glace au Québec dans un contexte de changements climatiques. *Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques* https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/Turcotte_1A.pdf
- Van Blyenburgh P (1999) UAVs: an overview. *Air & Space Europe, Volume 1*, Issues 5–6, Pages 43-47. [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(00\)88869-3](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(00)88869-3).
- Vazquez-Tarrío D, Borgniet L, Liébault F & Recking A (2017) Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps), *Geomorphology*, Volume 285, Pages 94-105, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.039>.

- Watanabe Y & Kawahara Y (2016) UAV Photogrammetry for Monitoring Changes in River Topography and Vegetation. *Procedia Engineering*. 154. 317-325. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.482.
- Westoby M, Brasington J, Glasser N, Hambrey M & Reynolds J (2012) "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, 300–314, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Zong-Jian L, Xiao-Dong P (2009) Low Altitude Photogrammetry of Unmanned Airship, *International Conference on Information Engineering and Computer Science*, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIECS.2009.5362736

7 ANNEXES

Annexe 1 : Procédure de démarrage et vérification pour le drone KILDIR-02

La procédure a été développée à la suite des problèmes rencontrés lors de la sortie du 4 février. Elle permettra de tester le drone et de s'assurer du bon fonctionnement de l'équipement avant de partir sur le terrain.

Chargement des batteries

1. Vérifier le voltage des batteries : max = environ 16.8 volts;
2. Charger les batteries : brancher les batteries sur un canal (A ou B). Le connecteur doit être branché dans 4S – XH;
3. Le chargement doit être en mode LiPO;
4. Suggérer de charger les batteries en mode BALANCE ce qui s'assure que chacune des 4 cellules de la batterie a le même voltage;
5. On appuie longuement sur ENTER, puis on confirme avec ENTER pour chacun des canaux;
6. Lorsque la batterie est chargée, la déconnectée.

Test de fonctionnement du drone (au labo ou avant un vol)

1. Enlever les hélices du drone;
2. Allumer la télécommande (s'assurer d'avoir la manette avec tous les modèles de drones présents, celle avec un point rouge dessus);
3. Choisir le modèle de drone pour KILDIR02 = OBS6-S4-Pix01;
4. Brancher une batterie au drone sur le connecteur qui se trouve à l'arrière du drone (près du collant KILDIR-02) (connecteur de tests);
5. Connecter l'ordinateur de contrôle au drone :
 - I. Brancher le transmetteur de télémétrie à l'ordinateur du drone (CODE SiK RADIO de KILDIR-02 = 100). On doit prendre le transmetteur 118 (modifié à 100);
 - II. On vérifie si un nouveau port s'est ajouté (ex. COM5 n'est pas là par défaut);
 - III. On choisit la vitesse de transmission = 57600;
 - IV. On appuie sur Connect.
6. Vérifier si on peut envoyer le plan de vol au drone :
 - I. On charge le plan de vol (Flight plan/Load WP File);
 - II. On écrit le plan de vol dans l'ordinateur du drone : Write WPs;
 - III. On vérifie si le plan de vol est bien écrit : (Clear Mission, Read WPs.).
7. Tester le drone au laboratoire :
 - I. Le signal GPS ne se rend pas au drone (ex. à l'intérieur) il sera impossible de décoller si le arming check est activé;
 - II. Désactiver le arming check : Dans Mission Planner aller à Config-Tuning/Full parameter list/Arming check = 0;
 - III. Démarrage des moteurs : le throttle du drone (manette de droite) complètement en bas à droite pour 5 secondes.
 - IV. Ensuite, éteindre les moteurs : le throttle du drone (manette de droite) complètement en bas à gauche pour 5 secondes.
 - V. Une fois le test complété : Réactivé le arming check, Arming check = 1;

Mission de vol (décollage sur le terrain)

1. Remettre les hélices sur le drone (Sens horaire = rouge, Sens anti-horaire = Noir);
2. Brancher les batteries chargées sur les connecteurs qui se trouvent sur les côtés du drone;
3. Avoir l'ordinateur de contrôle à proximité du pilote et une personne observant les informations de télémétrie affichées sur l'ordinateur portable;
4. Placer le drone dans un endroit sécuritaire pour le décollage;
5. S'assurer que l'orientation du drone est valide : Observer dans Mission Planner la ligne d'orientation du drone (ligne rouge) et s'assurer qu'elle correspond à la réalité du drone;
6. S'assurer que le plan de vol envoyé au drone est le bon (Read Wps), sinon, on charge le bon plan de vol et on l'envoie au drone (Write WPs).
7. Si aucune lumière sur le contrôleur du drone ne clignote, on est prêt à démarrer le drone (s'il clignote bleu, il n'y a pas de signal GPS, s'il clignote rouge, il ne peut pas décoller);
8. Démarrage du drone en mode Manuel : Throttle en bas à droite pendant 5 secondes. Les moteurs démarrent, en augmentant le throttle le drone décolle et prend son envol;
9. Une fois que le drone a atteint une distance convenable, on le met en mode plan de vol;
10. Une fois le plan de vol terminé, on effectue l'atterrissage en mode manuel.

Liste d'équipement pour le déploiement du Kildir-02

- Drone Kildir;
- Paires de batteries chargées;
 - Un minimum de cinq paires de batterie est nécessaire pour faire un déploiement
- Chargeurs de batteries et transformateur de courant/fils d'alimentation;
- Vérificateur de charge;
- Hélices du drone; Allen Key pour fixer les hélices;
 - S'assurer de prendre le bon type d'hélice: trois rouge (Clock Wise), trois noire (Counter Clock Wise);
- Coffre à outil
- Manette configurée avec le drone;
 - S'assurer de la bonne configuration avant le départ
- Transmetteur de télémétrie;
 - Voir procédure de vérification pour s'assurer de la bonne connexion
- Caméra SONY a6000;
 - Batteries de rechange pour caméra
 - Carte mémoire
- Ordinateur portable avec Mission Planner installé;
- Cônes;
- Pancarte « vol de drone en cours »;
- Dossards;
- Extension/rallonge électrique;
- Génératrice et son bidon d'essence;
- Station totale; trépied; clé USB
- Carnet de notes