DÉPARTEMENT DE GÉOMATIQUE APPLIQUÉE

Faculté des lettres et sciences humaines Université de Sherbrooke

Mini projet : PROPOSITION DE SERVICES MESURES D'ÉPAISSEUR DE GLACE PAR DRONE AU LAC MEMPRHÉMAGOG

par AMÉLIE TROTTIER-PICARD LOUIS CARRIER NOÉMIE GERMAIN-PAQUETTE VINCENT LE FALHER

Dans le cadre du cours GMQ708 Télédétection optique et radar

> Longueuil 21 décembre 2018

Table des matières

1.	Contexte			
2.	Obj	ectifs1		
3.		ences		
4.	Met	:hodologie		
4	.1.	Informations connues		
4	.2.	Plan d'échantillonnage		
4	.3.	Plateforme et capteur		
4	.4.	Validation terrain – Trous		
4	.5.	Analyse		
4	.6.	Communication des résultats		
5.	Livr	ables		
6.	Éch	éancier et organisation du projet		
7.	Ava	ntages de la solution proposée 6		
8.	Lim	itations, contraintes et exigences		
9.	Res	sources		
9	.1.	Ressources financières et modalités de paiement		
9	.2.	Ressources humaines et description des rôles		
10.	S	écurité9		
11.	Biblic	ographie		

ANNEXES

Annexe I – Cartes

Annexe II - Organigramme des opérations et échéancier par ressource

Annexe III – Démonstration de la technique

Annexe IV – Le radar et l'épaisseur de la glace, pour aller encore plus loin

Liste des figures

Figure 1 Épaisseur de glace minimale recommandée pour différentes activités	1
Figure 2 Échéancier global	5
Figure 3 Échéancier de la gestion de projet	
Figure 4 Échéancier de la prise des mesures	
Figure 5 Échéancier des activités par ressource	
Figure 6 Profil d'épaisseur de la glace sur un transect	
Figure 7 Profil radar d'un point de mesure d'épaisseur de la glace	
Liste des tableaux	
Tableau 1 Détail des transects d'échantillonnage	3
Tableau 2 Budget du projet	8
Tableau 3 Modalités de paiement	8
Tableau 4 Attribution des rôles et responsabilités	9

Proposition de service soumise par VLAN-Géomatique

1. Contexte

La ville de Magog veut assurer la sécurité de ses citoyens et des amateurs d'activités sur glace. Face aux enjeux de sécurité et de développement économique, la ville veut obtenir un suivi serré de l'épaisseur de la glace sur toute la période des activités hivernales.

Consciente des attraits touristiques que représentent les activités sur glace (pêche sportive, motoneige, sentier glacé, randonnée, etc.), la ville souhaite ainsi valoriser les activités touristiques hivernales sur une période optimale.

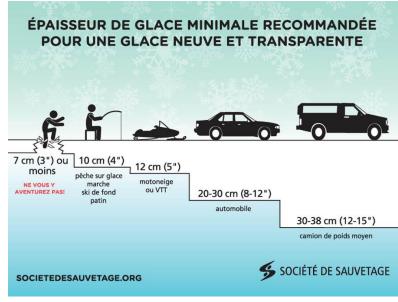


Figure 1 Épaisseur de glace minimale recommandée pour différentes activités.

2. Objectifs

L'objectif de cette soumission est de fournir périodiquement des données d'épaisseur de la glace du lac Memphrémagog à Magog pour toute la saison hivernale 2019-2020.

3. Exigences

Les éléments suivants ont été demandés lors de communications avec des représentants de la Ville de Magog :

- Territoire couvert : lac Memphrémagog dans les limites de la ville de Magog (Annexe I, carte 1)
- Activités ciblées : circulation pédestre et en motoneige
- Prise de mesures et mise à jour des données une à deux fois par semaine, du début des glaces (début variable, mais généralement entre le 10 et le 25 décembre) jusqu'au 15 avril
- Il n'est pas nécessaire d'estimer la surface à tout endroit sur la glace (par triangulation entre les données mesurées), mais les endroits à risque devraient faire l'objet de mesures plus fréquentes
- Environ 10% des données devraient être validées sur le terrain

4. Méthodologie

La méthode proposée par VLAN Géomatique est basée sur des mesures obtenues par un radar monté sur un drone et une validation de 5 à 10 % des données par une méthode standard de trous dans la

1

glace. Cette combinaison de méthodes permet de détecter une épaisseur de glace jusqu'à 80 cm. De plus, des transects de radar jusqu'à 800 m relevés jusqu'à deux fois par semaine fournissent une quantité inégalée de données pour les ressources investies.

4.1. Informations connues

Notre méthode tente d'optimiser les données accessibles pour concentrer les efforts aux endroits les plus critiques, aux moments appropriés. Ainsi, nous avons identifié trois lieux où la ville de Magog organise des événements hivernaux : la pointe Cabana et la pointe Merry du parc de la Baie-de-Magog, de même que le quai MacPherson. Des sentiers glacés sont notamment aménagés aux pointes Cabana et Merry. Les événements à ces trois lieux pourraient amener certains citoyens à s'aventurer sur le lac sans avoir pris toutes les précautions nécessaires, augmentant le risque d'incident à ces endroits. Aucun sentier officiel de motoneige ne traverse toutefois le lac à Magog.

Nous avons également identifié le ruisseau Castle et la rivière aux Cerises qui se jettent dans le lac et la rivière Magog qui prend sa source dans le lac comme zones d'intérêt. La circulation d'eau à ces endroits fragilise la glace, nécessitant un suivi plus serré.

Le lac Memphrémagog est le lieu de plusieurs stations de mesures qui peuvent être exploitées. Ainsi, l'historique des données météorologiques est disponible et une station météorologique d'Environnement Canada s'y trouve. Cet historique nous fournit des données sur les redoux et la quantité de pluie à attendre pendant la saison hivernale. Un suivi régulier des données météorologiques et des prévisions locales permettra d'ajuster les jours précis d'échantillonnage.

Une station hydrométrique de mesure de niveau d'eau d'Environnement Canada est également en place juste à côté du quai MacPherson. Cette station opérationnelle à l'année sera suivie pour déterminer si des informations peuvent être corrélées avec des variations d'épaisseur de la glace, améliorant le suivi pour les années à venir.

4.2. Plan d'échantillonnage

Nous avons identifié trois zones de priorité.

La *priorité* A regroupe les trois points près du ruisseau Castle, de la rivière aux Cerises et de la rivière Magog, avec les trois points de rassemblement des citoyens évoqués en 4.1 (Annexe I, carte 2). Ces transects de 400 à 800 mètres seront mesurés deux fois par semaine pendant toute la durée du projet (Tableau 1 et Annexe I, carte 3).

La priorité B regroupe une série de transects de 300 mètres entre les berges et jusqu'à 500 mètres du bord, en moyenne à chaque 1,5 km sur les berges à Magog. Cette concentration de transects sur les berges correspond à l'utilisation plus intensive des berges par les résidants pour un usage récréatif et reconnaît la nécessité de passer par les berges pour atteindre le centre du lac. Six de ces transects partent des berges, tandis que quatre de ces transects partent d'environ 200 mètres de la berge pour obtenir des mesures un peu plus éloignées des bords, où la glace prend davantage de temps à se former. Les transects de priorité B seront échantillonnés à chaque semaine en début et en fin de saison (les moments les plus critiques) et selon la météo en milieu de saison.

La priorité C regroupe deux transects atteignant le centre du lac Memphrémagog. Ils ne seront effectués que lorsque les berges seront gelées. Nous avons prévu les échantillonner une fois, avec la possibilité de répéter l'opération une deuxième fois au besoin.

Pour chaque transect, le radar monté sur drone parcourt le transect en continu. Pour les premiers 100 mètres les plus critiques, la médiane par 10 m est conservée et devient un point de mesure. Pour la suite du transect, la médiane par 25 m est conservée et devient un point de mesure. L'utilisation de la médiane assure un maximum de points de mesure avec une précision de 2 à 3 cm. En début de saison et selon les aléas de la météo, 10 % de ces points de mesure de radar seront validées par des trous. En milieu de saison, ce sont 5% des mesures de radar qui seront validées sur le terrain par des trous. Au total, plus de 7 500 données de radar et 430 données provenant de trous seront fournies, pour près de 8 000 mesures d'épaisseur de la glace.

Les transects sont présentés dans le Tableau 1 et le plan d'échantillonnage à l'Annexe I, carte 3.

Tableau 1 Détail des transects d'échantillonnage

Priorité	Lieu	Nombre de	Identifiant(s)	Longueur
		transects		(m)
Α	Quai MacPherson	1	A01	325
	Pointe Cabana	1	A02	375
	Ruisseau Castle et rivière aux Cerises	2	A03 et A04	400
	Rivière Magog	1	A05	600
	Rivière Magog	1	A06	800
В	Lien entre berge et île	1	B01	435
	Décalé des berges	4	B02, B05, B07 et B09	300
	Berges	6	B03, B04, B06, B08, B10 et B11	300
С	Centre	1	C01	675
	Baie de Magog	1	C02	2 125

4.3. Plateforme et capteur

Le radar sR-1200e de la compagnie IMST GmbH de fréquence 24 Ghz à modulation FMCW / CW¹ sera utilisé pour la prise des mesures. Ce radar peut opérer jusqu'à -40°C, consomme 4.5W et permet la prise de mesure à partir de 0,6 m de hauteur. D'un poids très léger de 280 g, il sera installé sur un drone Matrice 210 RTK permettant une portée d'au moins 500 m et pouvant opérer pendant 15 à 20 minutes jusqu'à -20°C. Les mesures seront effectuées au nadir (à la verticale) seulement. Le drone volera en continu à 20 km/h à une altitude entre 2 et 5 mètres afin de permettre une prise de mesure adéquate. Une gimbal soutient le radar pour s'assurer que celui-ci reste à la verticale et n'est pas incliné malgré le mouvement du drone.

Un certificat d'opération aérienne spécialisée (COAS) est nécessaire pour être conforme à la réglementation fédérale et est valide pour l'ensemble de la saison. Le signal rétrodiffusé du radar varie

¹ IMST GmbH. (2017). 24 GHz FMCW-RADAR KIT. Repéré à : http://www.imst.com/imst/en/support/download/circuits/LR HZ DK-sR-1200e Radar RZ 17 9 E.pdf

selon le type de glace rencontrée. Ainsi, avant chaque séance de mesures, le radar sera calibré selon les mesures de quatre trous dans la glace, afin d'adapter l'analyse selon la présence de neige, de glace blanche ou de glace noire, et pour s'assurer de l'absence d'eau sur la glace (voir section 8 - Limitations, contraintes et exigences).

Les séances de prises de données de radar sur drone seront effectuées à partir de 4:00 le matin, puisque les conditions de vol et la qualité de la surface (densité de la glace, neige) sont plus favorables à ce moment. De plus, la fréquentation du lac par des résidants est fortement limitée à ces moments. En cas de présence de personnes pendant les mesures, un transect pourra être légèrement décalé pour éviter, en tout temps, le vol du drone au-dessus d'une personne.

La température ambiante vient notamment limiter l'autonomie des batteries. VLAN Géomatique a prévu six ensembles de batteries pour le drone pour compléter les mesures promises et être prêt à toute éventualité.

4.4. Validation terrain – Trous

Des trous doivent être creusés dans la glace pour calibrer le radar à chaque séance de mesure et pour valider les données obtenues par radar. Ainsi, en début de saison et selon les aléas météorologiques, 10 % des données obtenues par des mesures radar seront corroborées par la méthode traditionnelle des trous dans la glace. Lorsque les conditions de glace seront stables, 5 % des données obtenues par des mesures radar seront corroborées par des trous dans la glace.

Les trous seront creusés avec une tarière à glace motorisée et géoréférencés avec un GPS. Cette méthode précise, mais exigeante, permet de creuser jusqu'à 1m20 de profondeur. Un technicien sera présent en tout temps pour assurer la qualité des mesures d'épaisseur de glace avec une règle.

4.5. Analyse

Un algorithme dédié et propriétaire permet d'analyser les données obtenues par le radar et d'en sortir une épaisseur de glace, selon les paramètres utilisés pour la calibration du radar (voir 4.3 et 4.4). L'algorithme permet de faire ressortir un des profils possibles suivants : épaisseur de la glace avec neige, épaisseur de la glace sans neige, gel jusqu'au fond, eau. L'algorithme est appliqué par un spécialiste junior et un spécialiste sénior valide l'ensemble des analyses effectuées. Cette approche permet d'automatiser le traitement de l'ensemble des données collectées, puisqu'il ne serait pas efficace de les traiter à l'unité par un salarié, la tâche étant trop laborieuse, exigeante et répétitive. La vérification des données et la corrélation entre ces données et les mesures d'épaisseur de glace par des trous viennent assurer la grande qualité des données fournies à la ville de Magog.

L'ensemble des mesures sera intégré à une base de données contenant toutes les mesures d'épaisseur de glace de la saison hivernale 2019-2020.

4.6. Communication des résultats

Pour assurer une transmission rapide des résultats, la ville de Magog pourra consulter une cartographie en ligne protégée par un compte privé. Un exemple de cartographie et d'échelle de mesure est disponible à l'Annexe 1, carte 4.

5. Livrables

La ville de Magog aura accès à une cartographie thématique et interactive disponible sur internet protégée par un compte privé. Cette cartographie web sera mise à jour à une fréquence bihebdomadaire, dans les 36 heures qui suivront chaque séance de mesures. La cartographie donnera accès au plan d'échantillonnage, aux données radar et aux données des trous. Pour chaque donnée, il sera possible de visualiser la dernière mesure enregistrée et la date de cette mesure. Un exemple de livrable peut être visualisé à l'Annexe 1, cartes 4 et 5.

De plus, à la fin du mandat, VLAN Géomatique remettra à la ville de Magog une base de données avec les mesures d'épaisseur de glace de toute la saison, le compte-rendu des rencontres (section 6) et un rapport de projet avec une ronde de révision au besoin.

6. Échéancier et organisation du projet

Une rencontre de démarrage est prévue dans les 15 jours suivant l'attribution du contrat. Nous souhaitons alors préciser vos attentes en lien avec la méthodologie que nous vous proposons, évaluer les données et le support que la ville de Magog est en mesure de fournir (voir section 8) et obtenir des commentaires sur les zones à risque et le plan d'échantillonnage soumis. VLAN Géomatique vous enverra un compte-rendu de cette rencontre. Cette rencontre est prévue en juin.

Pendant l'été, nous planifierons toutes les étapes pour nous assurer de vous offrir un projet clé en main réussi et qui répond à vos attentes.

En septembre, nous effectuerons la validation finale de la méthodologie. Cette étape peut être effectuée électroniquement, mais nous sommes prêts à nous déplacer au besoin.

En cours d'échantillonnage (10 décembre 2019 au 15 avril 2020), la cartographie

	Nom	Date de début	Date de fin
0	1. GESTION DE PROJET	03/06/19	30/04/20
+	1.1 Planification	04/09/19	15/11/19
	 Planification complétée 	15/11/19	15/11/19
+	1.2 Rencontres	03/06/19	30/04/20
	 Rencontres complétées 	01/05/20	01/05/20
0	GESTION DE PROJET complétée	01/05/20	01/05/20
0	2. PRISE DES MESURES	10/12/19	16/04/20
+	2.1 Préparation	10/12/19	15/04/20
+	2.2 Sortie	10/12/19	15/04/20
+	 2.3 Traitement et publication Web 	10/12/19	16/04/20
+	 2.4 Activitées de clôture de la sortie 	10/12/19	15/04/20
0	PRISE DES MESURES complétée	15/04/20	15/04/20
0	FIN DU PROJET	01/05/20	01/05/20

Figure 2 Échéancier global

en ligne sera mise à jour deux fois par semaine. Une communication sera maintenue au besoin.

Une rencontre de fin de projet est prévue pour vous présenter la saison et déposer le rapport du projet. Une ronde de révision sera alors possible (voir Annexe II pour l'organigramme et l'échéancier par ressource).

7. Avantages de la solution proposée

La solution que nous proposons pour mesurer l'épaisseur de la glace offre un large éventail d'avantages :

- Quantité inégalée de mesures précises
- Sécuritaire
- Peu intrusive
- Portable et légère
- Libre d'entretien durant les opérations
- Faible en consommation d'énergie
- Simple à implanter

- Flexibilité des zones d'étude
- Choix des jours et des intervalles de prise de mesure
- Faible en coût matériel et opérationnalisation
- Grande capacité d'enregistrement et de traitement
- Méthodologie éprouvée réduisant les erreurs d'interprétation

L'utilisation du radar est basée sur des principes physiques reconnus et solides. Le capteur radar émettra un profil² d'épaisseur de la glace (Annexe III, figure 6, ligne bleue) duquel nous conservons la médiane (Annexe II, figure 6, ligne violette) pour des mesures plus précises³.

Chaque point de donnée présente un profil (Annexe III, figure 7) qui montre l'épaisseur de la glace basé sur l'intensité du signal rétrodiffusé en fonction de la distance du radar (temps). L'intensité du signal rétrodiffusé dépend des surfaces rencontrées⁴. L'eau, au nadir, retourne un signal très fort. La couche d'eau qui peut être invisible sur la glace, ou entre la glace et la neige, bloque le signal radar (voir section 8). En l'absence d'eau, les interfaces air-neige, neige-glace, air-glace et glace-eau retourneront un fort signal ce qui nous permet de déduire l'épaisseur de la glace, selon les paramètres utilisés pour calibrer le radar.

Un signal radar de 24 GHz permet de pénétrer jusqu'à 1,60 m et de mesurer l'épaisseur de la glace jusqu'à 0,80 m, et jusqu'à 7 m de neige sèche. Un radar avec une fréquence de 24 GHz (longueur d'onde

² Le radar ne retourne pas une image. Il détermine l'épaisseur grâce à la différence entre les fréquences transmises et reçues. Voir Annexe IV.

³ Royer, A. & Pomerleau, P. (2017). Ice Radar (SIRA) project. NSERC CRSNG, Université de Sherbrooke.

⁴ Guay, M. & Ferro-Famil, L. (2016). Penetration depth of Synthetic Aperture Radar signals in ice and snow: an analytical approach. Repéré à : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01535482/file/20160316 Gay WRSMSP.pdf Gusmeroli, A. & Grosse, G. (2012). Ground penetrating radar detection of subsnow slush on ice-covered lakes in interior Alaska. The Cryosphere Discussions, 6 (6), 1435-1443. DOI: 10.5194/tc-6-1435-2012

Mätzler, C. & Wegmüller, U. (1987). Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies. J. Phys. D: Appl. Phys. 20 (12), 1623-1630. Repéré à : http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/20/12/013/meta

de 12,49 mm) répond aux besoins du projet tout en étant suffisamment léger pour être porté par un drone.

8. Limitations, contraintes et exigences

Couche d'eau et neige humide

La présence d'eau sur la glace ou d'une couche d'eau entre la neige et la glace empêche la mesure radar de l'épaisseur de la glace. La neige humide limite également la pénétration de l'onde radar et l'épaisseur de la glace détectée. Il s'agit de la limite la plus importante. Lorsque de telles conditions se présentent, les ressources seront concentrées dans une augmentation du nombre de trous dans la glace. Selon la fréquence d'événements météorologiques permettant la formation d'une couche d'eau par-dessus la glace, le nombre de mesures par le radar pourrait être réduit (estimation de 7 500 points radar). Si les conditions sont toutefois parfaites sur toute la saison, le nombre de mesures par radar sera plus élevé que promis.

La température, le niveau d'impureté et le taux de salinité de la neige et de la glace affectent les données. Une calibration en début de saison et selon la météo est nécessaire et prévue au projet.

Accès aux berges

Les transects de la priorité A sont accessibles à partir de lieux publics ou de parcs de la ville de Magog. VLAN Géomatique doit avoir accès à ces lieux pour effectuer les mesures et réaliser le contrat.

Les transects des priorités B et C sont placés tout autour du lac, où l'accès aux berges est la propriété privée de résidants riverains. VLAN Géomatique demande la collaboration de la municipalité pour communiquer avec les citoyens et les informer du déroulement d'un projet de suivi de l'épaisseur de la glace. Si un propriétaire foncier devait refuser tout accès à sa propriété pour accéder au lac, l'accès par un terrain voisin serait approprié et ne compromettrait pas la tenue du projet et la réalisation du contrat par VLAN Géomatique. La réalisation des transects de priorité B et C est conditionnelle à un accès facilité aux berges du lac Memphrémagog à Magog à plusieurs endroits.

VLAN Géomatique garantit son professionnalisme et sa bonne conduite dans ses contacts avec les citoyens.

Conditions météo pour vol

Le vol de drone est conditionnel aux bonnes conditions météorologiques. Les rafales de vent doivent être d'au plus 40 km/h (les vols auront lieu tôt pour minimiser le vent), la température au minimum à -20°C et il ne doit pas y avoir de pluie ou de pluie verglaçante. En cas de conditions défavorables, une séance pourra être décalée pour attendre de meilleures conditions.

Incertitude des mesures radar

L'incertitude sur les mesures radar est de ±3 cm. En combinant ces mesures à des trous dans la glace, VLAN Géomatique fournira des données fiables et précises en grande quantité.

9. Ressources

9.1. Ressources financières et modalités de paiement

Suite à une révision exhaustive du budget et à une optimisation des coûts, VLAN Géomatique est fier de vous offrir un prix inférieur à celui présenté le 11 décembre 2018.

Tableau 2 Budget du projet

Étape	Tâche détaillée	Quantité	Ressources humaines	Ressources matérielles	Total
Planification et gestion de projet	Campagne de terrain et analyse des données	1	29 170,00 \$	0,00 \$	29 170,00 \$
	Cartographie web	1	1 260,00 \$	700,00 \$	1 960,00 \$
Réalisation des mesures	Transects priorité A (incluant le déplacement de l'équipe)	38	3 124,00 \$	278,00 \$	129 276,00 \$
	Transects priorité B	15	2 681,00 \$	179,00\$	42 900,00 \$
	Transects priorité C	2	1 846,00 \$	351,00\$	4 394,00 \$
Fermeture du projet	Rapport et présentation	1	1 860,00 \$	0,00 \$	1 860,00 \$
				Sous-total	209 560,00 \$
				TPS	10 478,00 \$
				TVQ	20 903,61 \$
				Total	240 941,61 \$

Les équipes de travail se déplacent ensemble et sont en mesure d'effectuer tous les transects en une journée de travail au besoin. Ainsi, un déplacement est prévu pour chaque échantillonnage des transects de priorité A, mais pas pour les transects de priorités B et C puisque les équipes sont déjà sur place.

Tableau 3 Modalités de paiement

Moment du paiement	Montant
Compte-rendu de la rencontre de démarrage	3 %
Compte-rendu de la rencontre de validation méthodologique	30 %
30 jours après le début de l'échantillonnage	33 %
Rapport final révisé	34 %

9.2. Ressources humaines et description des rôles

Tableau 4 Attribution des rôles et responsabilités

Projet					
Responsable du projet	Assure la bonne exécution des activités du projet et la communication avec la ville de Magog				
Équipe terrain					
Un technicien pilote de drone	Responsable du matériel				
Il sera assisté par un des autres membres de l'équipe	Pilotage du drone				
Un ouvrier et un technicien sont en charge des trous	Prises des mesures - Radar et trous				
Spécialistes					
Un spécialiste senior	Responsables des traitements				
Un spécialiste junior	Mise à jour de la carte Web				

10. Sécurité

L'opération nécessitant les normes de sécurité les plus élevées pour les travailleurs est la réalisation et la mesure de trous dans la glace. Cette opération sera effectuée avec la présence en tout temps de deux personnes sur la glace, en plus d'un contact sur la berge autour du lac en mesure d'organiser une opération de sauvetage au besoin. Les travailleurs opéreront seulement en conditions sécuritaires, en progressant à partir de la verge et en arrêtant si la glace est de moins de 10 cm d'épaisseur.

La progression à partir de la berge est plus sécuritaire et supportée par des principes physiques de gel des lacs⁵. L'eau atteint un sommet de densité à 4°C et la phase liquide est plus dense que la phase solide. L'hiver, les eaux chaudes plus près de 4°C sont plus denses et au fond du lac, tandis que l'eau plus froide est à la surface. Le gel de la surface d'un lac a lieu lorsque l'eau du lac transfert de l'énergie à l'atmosphère qui est sous 0°C. Le transfert de cette énergie est plus rapide aux endroits où la profondeur du lac est moins grande, généralement près de la berge. Le centre du lac gèlera moins rapidement parce que la surface d'échange d'énergie avec l'atmosphère est proportionnellement moins grande par rapport au volume d'eau que dans les eaux peu profondes près des berges. La circulation d'eau près des cours d'eau vient toutefois fragiliser cette glace et une grande prudence.

Pour les drones, les vols auront lieu entre 04:00 et 07:00 du matin, alors que la fréquentation du lac est très limitée et que les vents sont souvent moins intenses. En aucun cas un drone ne volera au-dessus d'une personne. Deux personnes sont responsables du vol en tout temps : un pilote et un opérateur.

-

⁵ Darbois, B. (2013). Le gel d'un lac. Repéré à : https://questions2physique.wordpress.com/2013/01/20/le-gel-dun-lac/

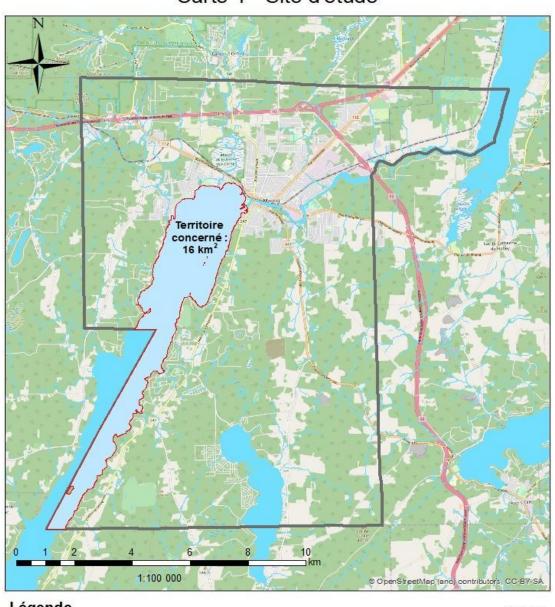
11. Bibliographie

- Darbois, B. (2013). *Le gel d'un lac*. Repéré à: https://questions2physique.wordpress.com/2013/01/20/le-gel-dun-lac/
- Guay, M. & Ferro-Famil, L. (2016). *Penetration depth of Synthetic Aperture Radar signals in ice and snow: an analytical approach*. Repéré à : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01535482/file/20160316_Gay_WRSMSP.pdf
- Gusmeroli, A. & Grosse, G. (2012). Ground penetrating radar detection of subsnow slush on ice-covered lakes in interior Alaska. *The Cryosphere Discussions*, 6 (6), 1435-1443. DOI: 10.5194/tc-6-1435-2012
- IMST GmbH. (2017). 24 GHz FMCW-RADAR KIT. Repéré à : http://www.imst.com/imst/en/support/download/circuits/LR HZ DK-sR-1200e Radar RZ 17 9 E.pdf
- Mätzler, C. & Wegmüller, U. (1987). Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 20 (12), 1623-1630. Repéré à : http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/20/12/013/meta
- Royer, A. & Pomerleau, P. (2017). Ice Radar (SIRA) project. NSERC CRSNG, Université de Sherbrooke.

ANNEXES

Annexe I – Cartes

Carte 1 - Site d'étude

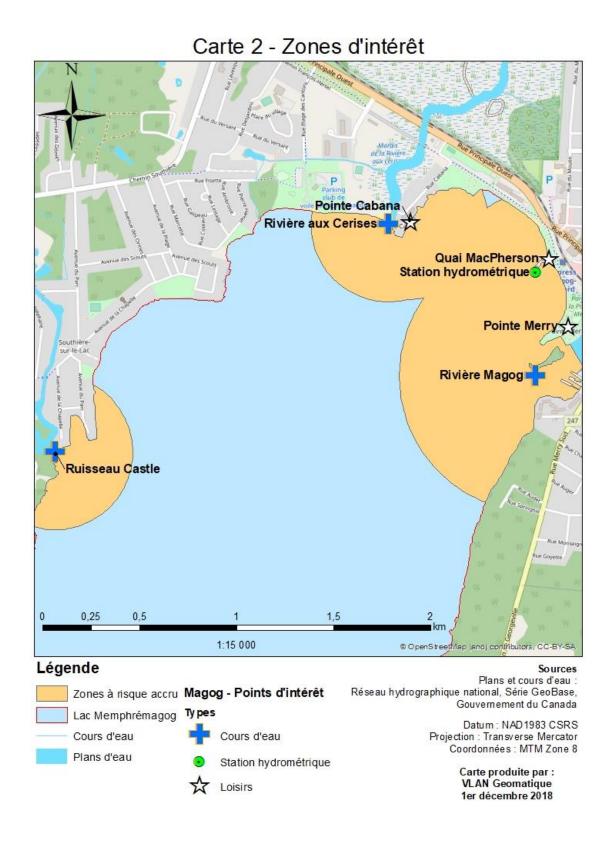


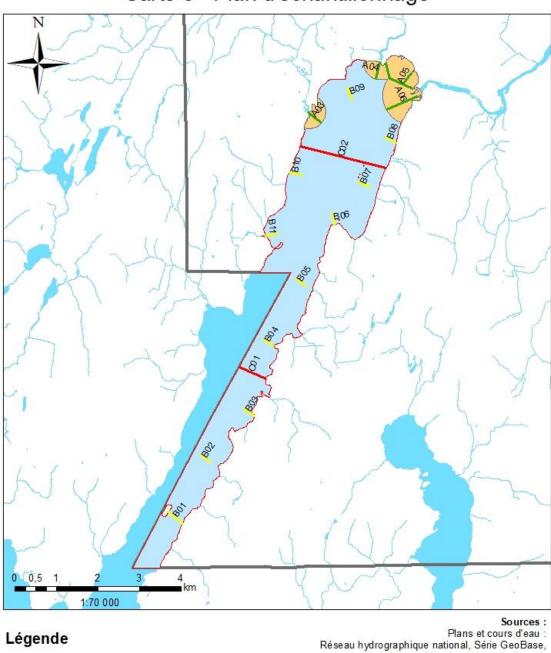


Plans et cours d'eau : Réseau hydrographique national, Série GeoBase, Gouvernement du Canada

> Datum : NAD1983 CSRS Projection : Transverse Mercator Coordonnées : MTM Zone 8

Carte produite par : VLAN Geomatique 1er décembre 2018





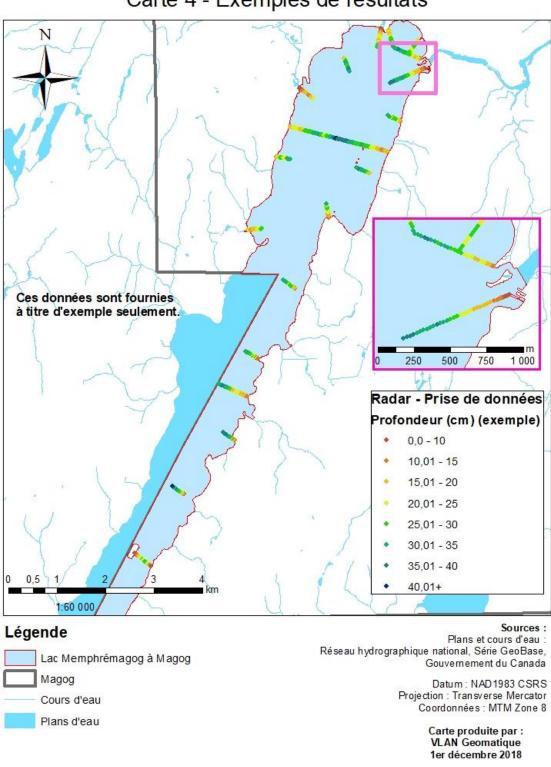
Carte 3 - Plan d'échantillonnage

Radar - Transects Risque accru Échantillonnage Zone d'étude Priorité 1 Magog Priorité 2 Cours d'eau Priorité 3 Plans d'eau

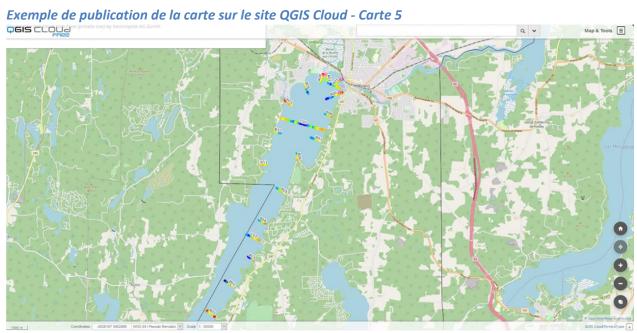
Gouvernement du Canada

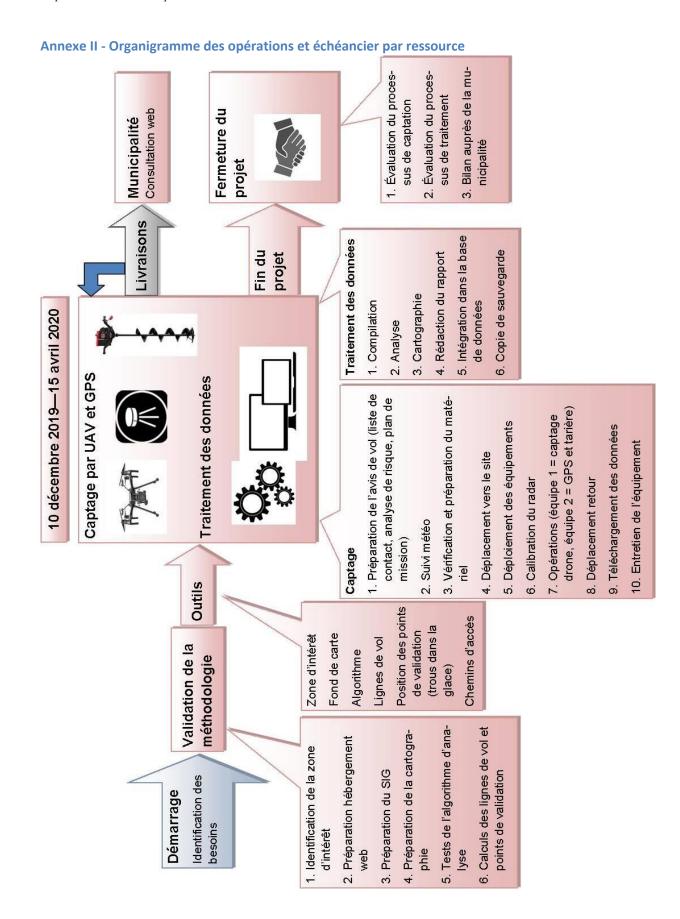
Datum : NAD 1983 CSRS Projection : Transverse Mercator Coordonnées : MTM Zone 8

Carte produite par : VLAN Geomatique 1er décembre 2018



Carte 4 - Exemples de résultats





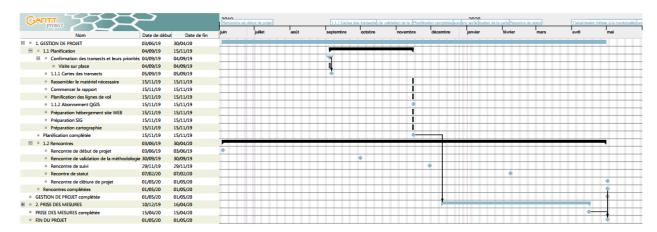


Figure 3 Échéancier de la gestion de projet

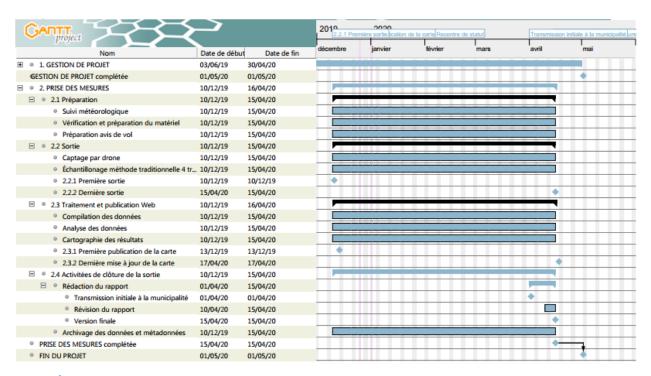


Figure 4 Échéancier de la prise des mesures

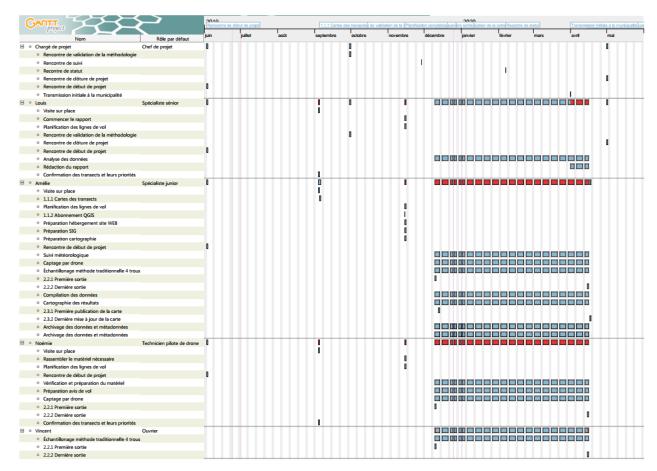


Figure 5 Échéancier des activités par ressource

Annexe III – Démonstration de la technique

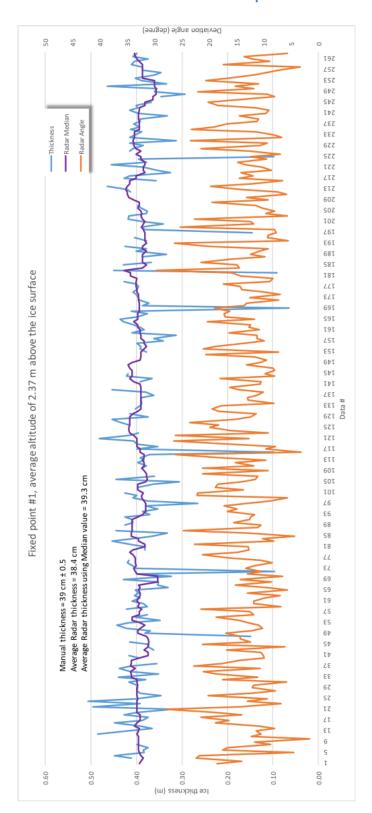


Figure 6 Profil d'épaisseur de la glace sur un transect

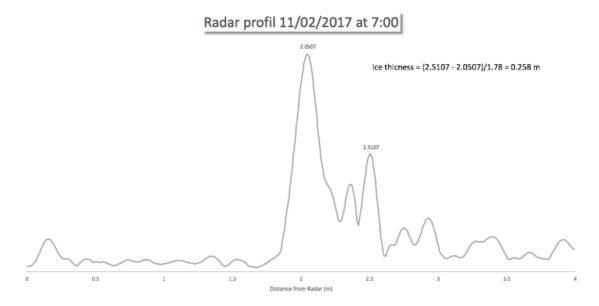


Figure 7 Profil radar d'un point de mesure d'épaisseur de la glace

Source : Royer, A. & Pomerleau, P. (2017). Ice Radar (SIRA) project. NSERC CRSNG, Université de Sherbrooke.

Annexe IV – Le radar et l'épaisseur de la glace, pour aller encore plus loin

La science à notre service

La permittivité (ϵ ') de la constante diélectrique (ϵ *) étant considérée constante (pour la glace ϵ '=3.17, n'=1.78), la mesure de la pénétration (p) dépend de la longueur d'onde (λ_0) et de la perte diélectrique (ϵ ''). Cette dernière est fortement liée à la température du volume (eau, neige, glace) et à son impureté, surtout son taux de salinité. Cela explique le niveau d'absorption du volume et l'impact sur l'intensité de retour du signal.

$$p = \frac{\lambda_0}{4\pi n''} = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''}$$
$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \varepsilon''$$
$$\varepsilon^* = n^2$$

Le radar FMCW-CW

« Modulated continuous-wave

Frequency-modulated continuous-wave radar (FM-CW) — also called continuous-wave frequency-modulated (CWFM) radar[5] — is a short-range measuring radar set capable of determining distance. This increases reliability by providing distance measurement along with speed measurement, which is essential when there is more than one source of reflection arriving at the radar antenna. This kind of radar is often used as "radar altimeter" to measure the exact height during the landing procedure of aircraft.[6] It is also used as early-warning radar, wave radar, and proximity sensors. Doppler shift is not always required for detection when FM is used.

In this system the transmitted signal of a known stable frequency continuous wave varies up and down in frequency over a fixed period of time by a modulating signal. Frequency difference between the receive signal and the transmit signal increases with delay, and hence with distance. This smears out, or blurs, the Doppler signal. Echoes from a target are then mixed with the transmitted signal to produce a beat signal which will give the distance of the target after demodulation. »

https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous-wave radar

Le radar FMCW-CW est plus avantageux que le radar à impulsion : il est moins onéreux et peut détecter des cibles proches.⁶

⁶Niksa Orlic (2017). What are the differences and pros/cons of pulsed vs. FMCW radar? Repéré à : https://www.quora.com/What-are-the-differences-and-pros-cons-of-pulsed-vs-FMCW-radar