

# CONCEPTION D'UN VÉHICULE AÉRIEN SANS PILOTE FAIT PAR SOI-MÊME À DES FINS DE RECHERCHE ARCTIQUE ET DÉMONSTRATION DE SES CAPACITÉS AU MOYEN DE PRÉLÈVEMENTS D'ÉPAISSEUR DE NEIGE PAR UNE STRUCTURE EN MOUVEMENT.



**D. Kramer<sup>1,2\*</sup>, J. Meloche<sup>1,2</sup>, A. Langlois<sup>1,2</sup>, D. McLennan<sup>3</sup>, B. Chapdelaine<sup>4</sup>, C. Gauthier-Barrette<sup>1</sup>, A. Royer<sup>1,2</sup> et P. Cliche<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Québec, Canada

<sup>2</sup> Centre d'études nordiques, Québec, Canada

<sup>3</sup> Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada

<sup>4</sup> Institut interdisciplinaire d'innovation technologique, Sherbrooke, Québec, Canada

\* [Daniel.kramer@usherbrooke.ca](mailto:Daniel.kramer@usherbrooke.ca)

## Résumé

Les véhicules aériens sans pilote (UAS) sont devenus monnaie courante dans de nombreuses applications scientifiques, y compris lors d'opérations dans des conditions environnementales difficiles. Toutefois, les UAS disponibles sur le marché capables de ce type de travail sont très coûteux et n'offrent qu'une flexibilité limitée pour le transport de charge personnalisée. Il est nécessaire d'avoir des systèmes de UAS rentables et personnalisés pour l'exploration des sites, la cartographie, les relevés et le profilage atmosphérique dans l'Arctique. L'objectif de ce projet était de développer une plateforme de construction faite soi-même, à partir de composants simples et préfabriqués capables d'effectuer des opérations de vol dans les conditions extrêmes de l'Arctique et de l'hiver polaire. Cette approche permet de faire voler toute une gamme de charges utiles d'instruments de détection destinés à différentes utilisations et d'effectuer facilement des modifications sur place et des réparations à faible coût. Le radar bande Ka utilisé par l'équipe de recherche (environ 700 grammes (g), 200 x 130 x 150 millimètres

(mm)) est un exemple de charge utile extrêmement adaptable. D'autres exemples plus courants sont les caméras comme la MAPIR Survey 3 (environ 50 g, 59 x 41,5 x 36 mm). Lorsque certaines garanties de fabrication (comme celle du senseFly) exigent que le UAS soit envoyé au fabricant même pour des réparations mineures, les modifications et réparations sur place peuvent permettre de maintenir un faible coût d'exploitation d'un UAS fabriqué soi-même.

Pour atteindre cet objectif, différents composants ont été testés dans des conditions contrôlées afin de vérifier leur fonctionnalité dans des températures extrêmement froides et leur compatibilité avec les dispositifs utilisés lors du travail sur le terrain. En vue de valider la capacité scientifique de la conception du système de UAS faite soi-même, une petite zone près de Cambridge Bay (Nunavut, Canada) a été étudiée pour y prélever une épaisseur de neige à l'aide d'une structure en mouvement. Cette étude a permis d'obtenir une carte de l'épaisseur de la neige avec une résolution

Référence suggérée :

Kramer, D., Meloche, J., Langlois, A., McLennan, D., Chapdelaine, B., Gauthier-Barrette, C., Royer, A., Cliche, P. 2019. Conception d'un véhicule aérien sans pilote fait par soi-même à des fins de recherche arctique et démonstration de ses capacités au moyen de prélèvements d'épaisseur de neige par une structure en mouvement. *Aqhaliat* 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 41-60. DOI: 10.35298/pkc.2019.05

horizontale de 6 cm. La profondeur de neige calculée, avec un écart-type de 16 centimètres (13 cm sans les points sur la végétation), correspond aux valeurs trouvées dans la littérature qui ont été prélevées à des latitudes plus basses au moyen de plateformes beaucoup plus coûteuses. Le principal type de UAS étudié dans ce projet peut fonctionner en toute sécurité à des températures aussi basses que -40 degrés Celsius (°C) et à des températures encore plus froides, mais avec des capacités légèrement réduites. La conception des UAS fait soi-mêmes est actuellement limitée à une vitesse de vent maximale de 10 mètres par seconde (m/s), ce qui comprend une grande marge de sécurité. Les prochaines étapes comprennent le développement d'un aéronef à voilure tournante pour transporter un système radar capable de profiler la neige et la glace et un aéronef à voilure fixe pouvant voler à des vitesses de vent supérieures à 10 m/s.

## Introduction

Les UAS sont fréquemment utilisés dans de nombreux domaines géoscientifiques (Anderson et al., 2019) et dans le cadre de recherches arctiques (Chudley et al., 2019). Les utilisations scientifiques en Arctique bénéficieront grandement des possibilités offertes par les UAS. Par exemple, les méthodes traditionnelles de prélèvement de la profondeur de la neige (Langlois et al., 2010), comme les mesures manuelles avec une sonde à avalanche ou le creusement d'un puits à neige, prennent beaucoup de temps et sont limitées à une petite zone, ce qui entraîne des problèmes de représentativité. Les UAS peuvent couvrir une zone beaucoup plus grande (Jo et Kwon, 2019), éviter l'interpolation spatiale et peuvent facilement suivre les changements dans une zone au fil du temps (par exemple, la végétation). En outre, en représentant mieux les processus locaux (distribution de la neige par rapport à la rugosité/topographie) qui sont difficiles à représenter avec la résolution spatiale plus grossière des images satellites, les UAS peuvent également réduire les incertitudes de la modélisation (Rutter et al., 2014).

La technologie des UAS se développe rapidement et devient de plus en plus facile à utiliser. Néanmoins, les conditions environnementales difficiles des régions polaires exercent une pression considérable sur les

aéronefs, ce qui peut constituer un défi pour trouver des solutions simples et facilement accessibles (DJI, 2015). En outre, ces systèmes sont souvent fermés et ne permettent pas de modifier les paramètres ou de procéder facilement à l'entretien et à la réparation sur place. Les systèmes de pointe, comme le senseFly eBee ou le Microdrones md4-3000, peuvent mieux gérer des conditions environnementales difficiles, mais leur prix, qui peut dépasser 30 000 \$ US, peut être prohibitif. En outre, ces systèmes de pointe ne permettent généralement pas de modifier les charges utiles ou d'attacher des systèmes ou des capteurs pour des besoins scientifiques précis. La construction fait soi-même constitue un substitut à ces systèmes. Elle permet d'effectuer des modifications précises sur un aéronef pour qu'il puisse accomplir la tâche désirée. Cette méthode permet également d'effectuer facilement des réparations et des modifications pendant les campagnes sur le terrain pour résoudre les problèmes qui surviennent. Un avantage supplémentaire est la possibilité de réutiliser les composants électroniques dans différents UAS, ce qui réduit considérablement le prix des nouveaux aéronefs puisqu'un nouveau cadre peut généralement être acheté pour moins de 200 \$ US.

La philosophie qui sous-tend la partie technique de cet article est de construire des UAS simples et peu coûteux pouvant fonctionner dans l'Arctique et répondant aux normes scientifiques en matière de précision des prélèvements en surface. On a pris soin d'éviter les procédures compliquées avec les autorités de l'espace aérien, en l'occurrence Transports Canada (TC). Le choix du site et des tâches ont été conçus pour répondre à toutes les dispenses de Transports Canada (par exemple, la distance par rapport aux zones bâties, la classe d'espace aérien, et les altitudes et distances de vol). Bien que cette conception limite les possibilités de vol, elle évite le temps d'attente associé à la demande et à l'obtention de certificats d'opérations aériennes spéciales (COAS)<sup>1</sup> et permet de prendre des décisions de dernière minute fondées sur des données scientifiques concernant les besoins de vol.

Pour démontrer que cette approche peut répondre aux normes scientifiques en matière d'acquisition de données, cet article vise à fournir :

<sup>1</sup> La réglementation de Transports Canada a changé à compter du 1er juin 2019. Les restrictions en place pendant le projet ne sont plus en vigueur. La nouvelle réglementation qui sera en vigueur pour les futures missions de vol peut être : <https://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/drone-safety/new-rules-drones.html>.

- Des détails techniques sur la méthode du projet, y compris des renseignements sur le matériel et les logiciels, et les leçons tirées des campagnes précédentes.
- Un exemple d'utilisation en prélevant la profondeur de la neige à l'aide d'une structure en mouvement, validé par des mesures sur le terrain.

Par conséquent, le présent article est divisé en deux rubriques principales : Tout d'abord, une description des solutions techniques, des expérimentations et des expériences d'utilisation d'un UAS dans l'Arctique, puis une démonstration des capacités de la conception du système de UAS fait soi-même pour prélever l'épaisseur de la neige dans l'Arctique.

## Développement et aperçu de l'UAS

Cette rubrique aborde les configurations des différents aéronefs et l'incidence de l'environnement sur les matériaux et les composants électroniques. Certaines expériences ont été menées dans un environnement contrôlé (chambre météorologique), tandis que d'autres tests et observations ont été effectués lors du travail sur le terrain. Notons que le fait de travailler près du pôle géomagnétique (par exemple, Cambridge Bay, 1 500 kilomètres (km)) en utilisant un magnétomètre peut causer des problèmes de vol pour les UAS. Il peut être nécessaire de passer en mode de vol manuel, car la plupart des UAS utilisent un magnétomètre pour déterminer le cap lorsqu'ils volent en pilote automatique. Les aéronefs à voilure tournante ou multicoptères reposent fortement sur les magnétomètres pour s'orienter en raison de leur capacité à voler en mode stationnaire ou à basse vitesse. En comparaison, les aéronefs à voilure fixe peuvent prévoir leur direction uniquement à partir du suivi de la navigation ponctuelle du précédent système de positionnement mondial (GPS) (Ader and Axelsson, 2017). Cimoli et al. (2017) ont utilisé une voilure tournante dans l'Arctique et ont produit un bref rapport sur leur expérience : « *La navigation au GPS et à la boussole est compromise à haute latitude (en raison des interférences du champ magnétique) [...]. Les pilotes devraient être préparés à réaliser la levée en mode manuel.* »

D'après des expériences personnelles et des rapports de collègues, des envolées sur des trajectoires

aléatoires se sont produites avec les anciennes versions des produits DJI. Avec les versions plus récentes, le pilote automatique passe automatiquement en mode *maintien de l'altitude/manuel* lorsqu'il essaie de voler *en mode complètement automatique complet ou GPS*. Bien que le vol manuel soit possible, des compétences de vol très avancées sont nécessaires pour obtenir de bonnes mesures des capteurs installés sur le UAS. Par exemple, si une approche par structure en mouvement est prévue, l'angle, la vitesse et la synchronisation des caméras doivent être contrôlés pour assurer un chevauchement suffisant entre les photographies. Une autre solution serait d'enregistrer des vidéos plutôt que de prendre des photographies. Cependant, cette solution nécessite un post-traitement plus intensif et diminue la résolution des images.

Pour les besoins de ce projet, il a été décidé de n'utiliser le GPS que pour la navigation à bord de l'aéronef et d'avoir en plus recours à l'étalonnage du pilote automatique. Pour cette raison, la conception du UAS fait soi-même utilise un cadre à ailes fixes. Le pilote automatique peut être utilisé sans magnétomètre et les aéronefs à voilure fixe sont mieux adaptés pour des temps de vol plus longs, ce qui est bon pour la cartographie. Un aéronef Phantom 3 Professional de DJI a également été utilisé à plusieurs reprises en mode manuel à des fins de comparaison.

### Batteries

La section suivante décrit les tests de batterie qui ont été effectués pour identifier les temps de vol potentiels selon différentes conditions de température. L'objectif de ces essais était de mieux comprendre les performances des batteries, par exemple, leur durée de vie pour une certaine charge, indépendamment du type de UAS utilisé, de la vitesse du vent ou d'autres facteurs. La connaissance des performances des batteries est un aspect important de la planification des missions de vol car elle influe les décisions concernant notamment les lignes de vol, la zone de couverture et le temps de vol prévu en fonction des conditions météorologiques du moment. Les batteries LiPO ont été choisies pour la flotte utilisée dans ce projet. Ces batteries sont largement utilisées pour les UAS, car elles offrent [Traduction] « le compromis optimal entre une charge spécifique modérée, une puissance massique élevée et une durée de vie élevée » (Abdilla et al., 2015 ; Mulgaonkar et al., 2014). L'objectif à long terme est de

couvrir des distances similaires à celles des UAS offerts sur le marché (par exemple, 1000 m<sup>2</sup>), tout en étant capable de changer de charge utile sur place.

### Mise en place des tests

La consommation d'énergie a été estimée en analysant un véritable journal de bord d'un aéronef à voilure fixe (BlitzRCWorks Skysurfer Pro, voir figure 5, à gauche) ne transportant aucune charge utile. Le vol s'est déroulé dans de bonnes conditions (< vent de 10 mètres par seconde (m/s), environ 0 degré Celsius (°C)). L'ampérage (A) utilisé pendant le vol a varié entre 1 A et 25 A, et l'essentiel de l'énergie a été consommée pendant le décollage et la montée. En vol plané, presque aucune puissance n'était nécessaire, de sorte qu'une charge moyenne de 16 A a été calculée pour reproduire la consommation « normale » du vol. Le tableau 1 énumère les batteries testées. La décharge constante fait référence à la vitesse à laquelle la batterie peut se décharger, sans arrêt, sans être endommagée. La décharge de pointe désigne la capacité de la batterie à décharger une quantité plus importante que la décharge constante sur une courte période de temps. Le schéma de l'expérience est présenté à la figure 1.

### Types de tests et protocole

Trois types de tests ont été réalisés.

**Premier type de test :** Pendant le test, une charge élevée constante (16 A) a été appliquée à une température spécifique. La batterie test a préalablement été conservée à température ambiante pour simuler le maintien d'une batterie chaude (par exemple, près du corps) lors d'une sortie sur le terrain.

**Deuxième type de test :** La batterie test a d'abord été gelée à une température spécifique pour simuler son

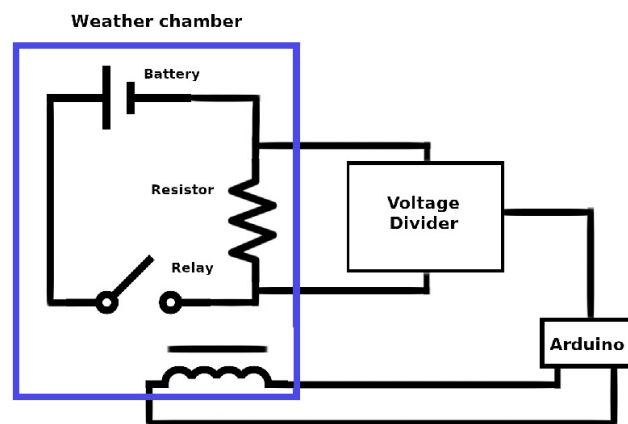


Figure 1 : Mise en place expérimentale.

transport sur le terrain, sans protection thermique. Tout comme pour le premier type de test, la charge appliquée était de 16 A.

**Troisième type de test :** Pendant le test, une petite charge faible (1 A) a été appliquée pour étudier l'effet des températures froides sur la durée de vie des batteries. La batterie test a préalablement été conservée à température ambiante.

Le protocole suivant a été utilisé pour normaliser les tests :

1. Toutes les parties du circuit sont connectées, et deux congélateurs sont utilisés. Le premier, dans lequel une batterie est insérée, est maintenu à une température constante. L'autre a été réglé à -80 °C pour refroidir la charge (plusieurs résistances). Les résistances sont contrôlées par un microcontrôleur Arduino, qui est connecté à un relais. Les résistances sont utilisées pour simuler la charge appliquée pendant un vol.

Tableau 1 : Batteries utilisées lors de l'expérience. Toutes les batteries ont 4 cellules.

| Batterie                | Milliampères par heure (mAh) | Volts (V) | Watts par heure (Wh) | Cote C de décharge constante | Cote C de décharge de pointe |
|-------------------------|------------------------------|-----------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| Phantom 3               | 4480                         | 15.2      | 68                   | S.O.                         | S.O.                         |
| Nano-tech 4.0 (Turnigy) | 4000                         | 14.8      | 59.2                 | 30 C                         | 40 C (10s)                   |
| Multistar 4.0 (Turnigy) | 4000                         | 14.8      | 59.2                 | 12 C                         | 24 C                         |
| Multistar 5.2 (Turnigy) | 5200                         | 14.8      | 76.96                | 12 C                         | 24 C                         |

- Lors des tests de types 1 et 2, le congélateur était réglé et maintenu à une température souhaitée. La température variait de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui reflète les conditions normales du travail sur le terrain. Les tests ont été effectués à des intervalles de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les résultats de l'essai de type 3 allaient de  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Une batterie complètement chargée a été placée dans le congélateur et connectée au circuit. Les piles ont toujours été placées dans la même position, orientation et partie du congélateur pour éviter que des facteurs aléatoires n'influencent les résultats.
- Au début, après environ 350 secondes, et à la fin de chaque test, la résistance (R) a été mesurée pour vérifier que la charge demeurait constante et qu'il n'y avait pas de dysfonctionnement de la résistance.
- Pour éviter d'endommager la batterie, le système s'arrête automatiquement lorsque la batterie atteint  $12,6\text{ volts (V)}$  ( $3,15\text{ V}$  par cellule). Des explications plus détaillées seront données dans la rubrique Résultats.
- Pour chaque réglage, le test a été répété 3 fois par batterie (sauf pour le test de type 3, qui est expliqué plus en détail ci-dessous).

## Résultats des tests

Pour tous les tests, la R se situait dans une fourchette comprise entre  $0,93$  et  $0,98\ \Omega$ . La charge pendant les tests a donc été conforme à ce qui était prévu.

**Premier type de test :** La figure 2 compare la décharge des trois différents types de batteries à trois températures différentes. La batterie du Phantom 3 a tellement chauffé lors du premier test, que les autres tests avec cette batterie ont été interrompus. Lors de tests répétés, la performance de chaque batterie était relativement similaire, bien qu'il y ait des différences visibles entre les types de batterie. Comme les batteries perdent de leur résistance avec le temps, il est important de noter qu'aucun enregistrement des cycles des batteries n'a été conservé. Les Multistar 4.0 et 5.2 étaient presque neuves, et la Nano-tech 4.0 était utilisée depuis environ deux ans.

Le Multistar 5.2 possédait la plus grande capacité avec  $5\ 200$  milliampères par heure (mAh), tandis qu'à  $4\ 000\text{ mA}$ , le Multistar 4.0 et le Nano-tech 4.0 avaient la même capacité. La Multistar 4.0 et la Nano-tech 4.0 ont des cotes C différentes (appel de courant maximum de sécurité)—la cote de la Nano-tech est plus élevée ( $25$  à  $50\text{ C}$ ) que celle de la Multistar 4.0 ( $12\text{ C}$ ).

Les trois batteries ont connu une forte baisse de capacité à environ  $14,5\text{ V}$ . Dans la figure 3, chaque type de batterie est présenté dans son propre graphique, qui montre également les différentes températures. La Nano-tech 4.0 (graphique de gauche) est la plus sensible à la température. Elle perd environ 3 minutes de temps opérationnel à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $7,35$  minutes) par rapport à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $10,28$  minutes). Le Multistar 4.0 (graphique du milieu) perd un peu plus d'une minute de temps à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $11$  minutes) par rapport à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $12,16$  minutes). Le Multistar 5.2 (graphique de droite) perd presque exactement 1 minute de temps entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

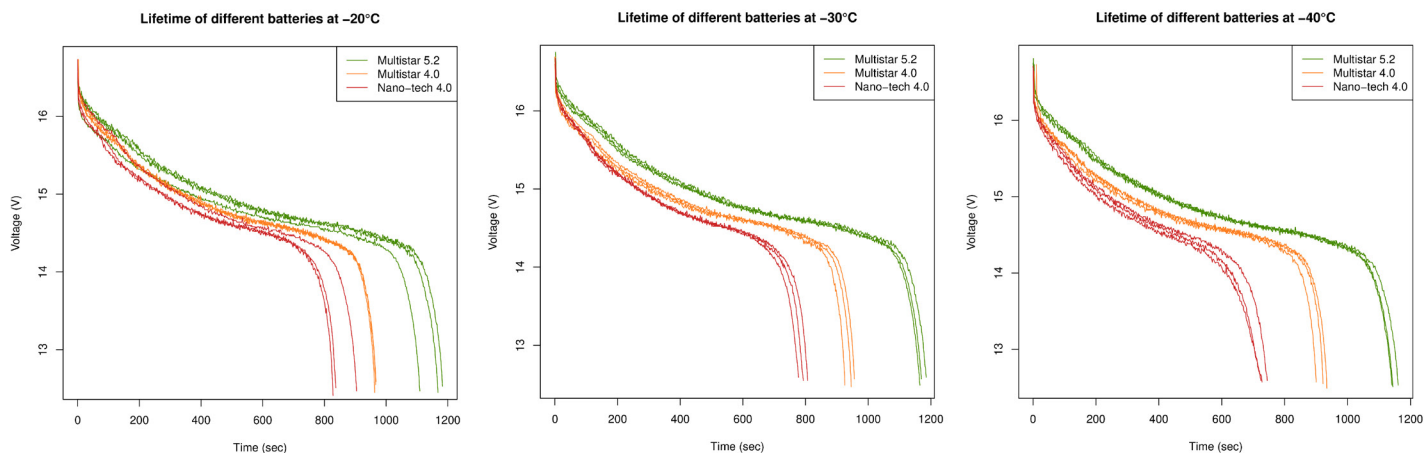


Figure 2 : Comparaison de trois différents types de batterie à trois températures différentes.

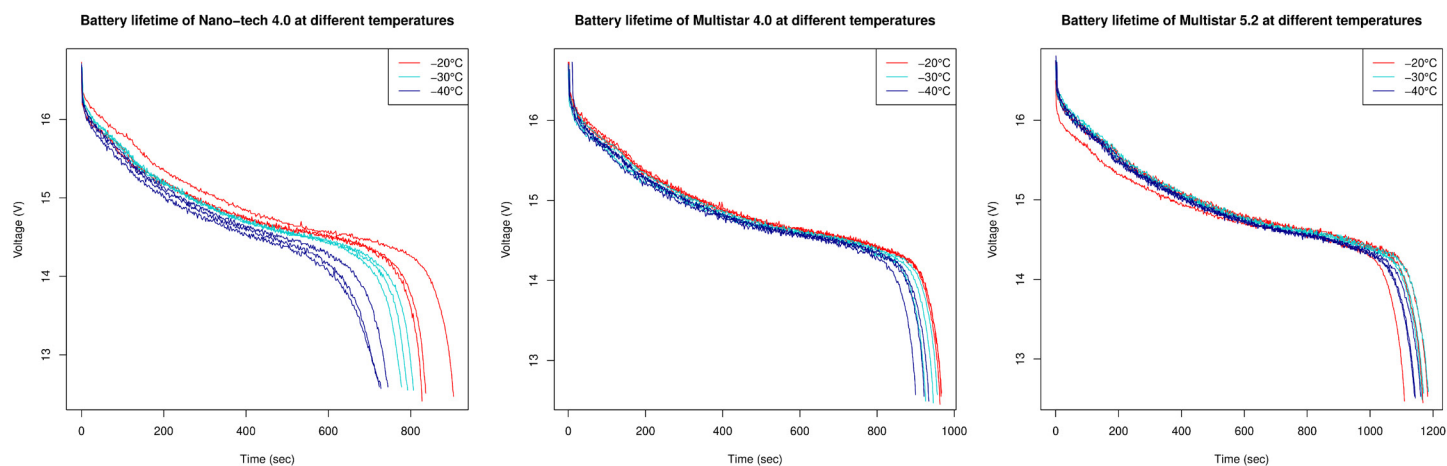


Figure 3 : Résultats de trois différents types de batterie à trois températures différentes.

Dans les trois cas, les résultats représentent des valeurs moyennes sur les trois tests effectués avec chaque batterie à chaque température.

**Deuxième type de test :** Le premier test a été effectué à  $-20^{\circ}\text{C}$  et la batterie a été exposée au froid pendant 30 minutes. Lorsque la charge a été appliquée, la tension est immédiatement passée sous 12,6 V. Comme il s'agissait de l'extrémité supérieure du test de température, aucun autre test n'a été effectué. Seule la Nano-tech 4.0 a été testé. On a présumé que d'autres batteries LiPo, bien qu'ayant peut-être une composition chimique légèrement différente, réagiraient de la même manière.

**Troisième type de test :** Le protocole décrit dans la section précédente a été répété à cinq températures différentes avec le Nano-tech 4.0 (voir figure 4). Le test à  $-8^{\circ}\text{C}$  a dû être réalisé dans des conditions réelles, à l'extérieur, la nuit, avec des températures variables. Au moment de l'essai, l'équipement n'a pas pu refroidir à une température supérieure à  $-20^{\circ}\text{C}$ . Pour la température à  $+4^{\circ}\text{C}$ , un réfrigérateur classique a été utilisé tandis que les autres tests ont été effectués dans une chambre climatique contrôlée. Les résultats présentés dans la figure 4 suggèrent que l'impact de la température sur la capacité de décharge est plutôt faible à  $-20^{\circ}\text{C}$ , mais un changement significatif peut être observé à des températures plus basses (à environ 50 minutes après le début de l'essai).

## Discussion

**Premier type de test :** L'âge de la batterie semble jouer un rôle important. La Nano-tech 4.0 est nettement moins performante que les autres, bien que ses caractéristiques soient comparables à celles de la Multistar 4.0. Le tableau 2 présente la durée moyenne de fonctionnement de chaque batterie pour chaque température (moyenne de trois essais). La tension a été mesurée et enregistrée tout au long du test ainsi qu'au le moment où la batterie a atteint 14,50 V pour la

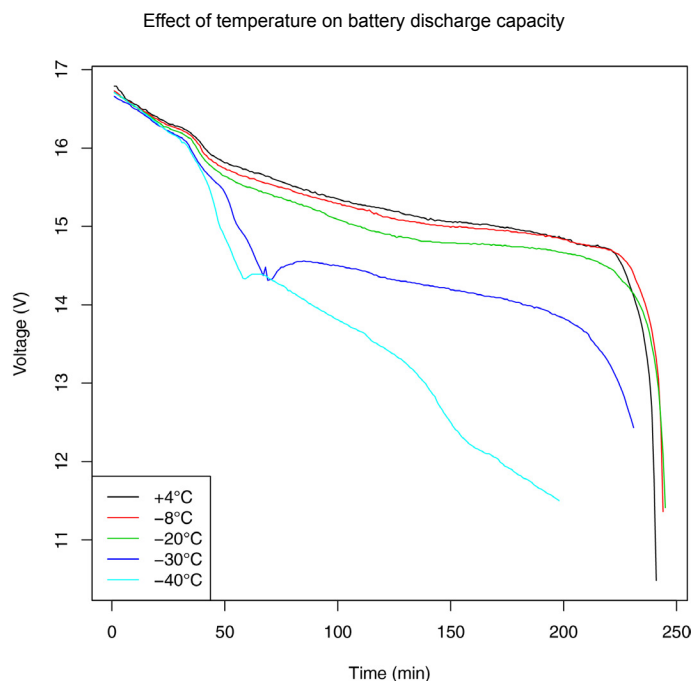


Figure 4 : Exposition à long terme d'une batterie (Nano-tech 4.0) à différentes températures. Il faut noter la nette diminution de la capacité de décharge à environ 50 minutes pour des températures de  $< -30^{\circ}\text{C}$ .

première fois. Les résultats sont similaires aux valeurs trouvées dans la littérature. Voir par exemple Winslow et al. (2016). Après cet intervalle, la capacité de la batterie diminue fortement. Pour éviter d'endommager la batterie, sa tension ne doit jamais descendre en dessous de 12 V, bien qu'un tampon supplémentaire de 0,5 V ait été intégré dans la conception du projet. Le 12 V est le résultat combiné de batteries à 4 cellules, chacune d'elle ayant une limite inférieure de 3 V. La cellule typique a une portée opérationnelle de 2,3 à 4,2 V (Salerno et Korsunsky, 1998), mais la règle du 3 V est une règle empirique largement utilisée car la chute du voltage n'est pas linéaire.

**Tableau 2 : Temps en secondes jusqu'à ce que la batterie atteigne 14,50 V. Peu après l'atteinte de cette valeur, les tensions de toutes les batteries chutent brusquement jusqu'à atteindre la limite de coupure de 12,5 V. La valeur affichée constitue la valeur moyenne de 3 tests.**

| Température | Nano-tech 4.0 | Multistar 4.0 | Multistar 5.2 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|
| -20 °C      | 617 s         | 730 s         | 897 s         |
| -30 °C      | 537 s         | 702 s         | 897 s         |
| -40 °C      | 441 s         | 654 s         | 832 s         |

Ce test nous permet de mieux estimer les temps de vol, en supposant une charge constante. La charge utilisée pour les tests était suffisamment élevée pour sous-estimer plutôt que surestimer les temps de vol. Comme il a été mentionné, la différence entre le Nano-tech 4.0 et le Multistar 5.2 (et dans une certaine mesure le Multistar 4.0) est de près de 3 minutes par rapport à une température de -20 °C et de -40 °C, respectivement. Puisque la Nano-tech 4.0 est de loin la batterie la plus vieille, ce résultat suggère qu'il est raisonnable de répéter ce type d'expérience comme une « bonne habitude » avant un déploiement utilisant des batteries plus vieilles, pour assurer la navigabilité et estimer le temps de décharge. L'achat d'une nouvelle batterie n'est pas une grande dépense et pourrait améliorer considérablement la sécurité et le temps de vol.

**Deuxième type de test :** En raison des différentes compositions chimiques, cette valeur peut varier pour chaque type/fabricant de batterie. Les résultats des tests indiquent toutefois que la meilleure pratique consiste à garder les piles chaudes jusqu'au

dernier moment. Comme les sites de recherche sont généralement à  $\geq 30$  minutes des locaux, des mesures doivent être prises pour s'assurer que les piles restent chaudes jusqu'à leur utilisation.

**Troisième type de test :** Une différence a été constatée entre les mesures de tension prises à la fin de l'expérience et celles prises après avoir retiré la batterie de la chambre météorologique et l'avoir laissé réchauffer. Idéalement, la batterie devrait être testée sans charge dans les deux conditions. L'impédance de la batterie augmente à mesure que la température baisse (Wang, 2015). Ce phénomène démontre qu'une baisse de température entraîne une perte de capacité de décharge, qui est principalement causée par une augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui réduit le taux de décharge et la capacité (Wang, 2015). D'un point de vue pratique, la perte significative de la capacité de décharge entre -20 °C et -30 °C n'est pas particulièrement pertinente pour les besoins de ce projet de conception. Comme les durées de vol typiques sont inférieures à 50 minutes et que la charge typique de la batterie est plus élevée, la batterie serait vide avant que le froid n'ait un impact.

## Cadres

Diverses plateformes disponibles sur le marché ont été testées pour ce projet de conception, y compris deux plateformes à voilure fixe faites soi-même (toutes deux des motoplaneurs) et une plateforme à voilure tournante disponible sur le marché. Pour lancer les missions des UAS, des vols d'essai ont été effectués dans le cadre de diverses campagnes dans le sud de l'Ontario, au Nunavut et au Québec. Le prix initial de notre système à construire soi-même était d'environ 1 250 \$ US, ce qui est comparable au coût d'une solution d'entrée de gamme, comme le Phantom 3 Professional de DJI. Le Phantom 3 Professional de DJI a été utilisé pour représenter un système disponible sur le marché et une plateforme bien connue. Bien qu'il s'agisse d'un type différent de UAS (à voilure tournante) qui ne peut pas être comparé en tous points aux cadres à voilure fixe, il a servi de référence pour les tests.

Le Phantom 3 Professional de DJI a rapidement produit des résultats et a été un bon outil pour lancer les missions de UAS. Cet appareil a été utilisé dans la région de la baie de Quinte (sud de l'Ontario, Canada ; 44° 43' 06,5370"N, 77° 35' 46,6923"O) pour une campagne de cartographie de la neige en 2017 et dans le bassin

versant du lac Greiner près de Cambridge Bay (Nunavut, Canada ; 69°14'11,78 "N, 104°52'55,10 "O) lors d'une campagne estivale en 2018. Pendant la campagne de cartographie de la neige dans la baie de Quinte, le Phantom 3 Professional de DJI a connu quelques problèmes, mais il a pu voler en utilisant le réglage du pilote automatique. Malheureusement, il a été impossible d'utiliser le pilote automatique pendant la campagne estivale au bassin versant du lac Grenier. Nous supposons que la proximité relative du pôle Nord magnétique a perturbé les lectures du magnétomètre nécessaires à l'orientation et a obligé le pilote à voler manuellement.

La première plateforme faite soi-même construite et testée a été le BlitzRCWorks Skysurfer Pro. Cet aéronef n'avait pas de compartiment de charge utile et devait être adapté. Selon le fabricant, la masse en vol de l'aéronef est de 650 g. L'adaptation a nécessité d'ajouter 117 g pour la caméra (GoPro 6) et 485 g pour une batterie plus grande que nécessaire (Turnigy Nano-Tech 4.0). Par suite de ces modifications, la masse au décollage était de 1 252 g, ce qui a mis le moteur à la limite de ses capacités de propulsion. La conception personnalisée a permis de prélever des données et a été utilisée lors d'une campagne d'hiver et d'une campagne d'été à Cambridge Bay, ainsi que lors de vols d'essai dans la région de Sherbrooke (Québec, Canada).

Bien que la construction ait été facile, les vols d'essai ont permis d'identifier quelques problèmes, notamment le fait que le variateur de vitesse électronique du BlitzRCWorks Skysurfer Pro ne fonctionnait pas sous 0 °C. En raison de cette découverte, tous les composants électroniques ont été testés dans les chambres météorologiques, qui devaient initialement uniquement se concentrer sur les capacités de décharge des batteries. De plus, l'aéronef a une capacité de charge utile très limitée et, faute d'expérience préalable, la batterie la plus puissante qui puisse y être installée a été utilisée pour assurer une puissance suffisante pendant le vol. Les avantages de la plateforme BlitzRCWorks Skysurfer Pro sont son faible prix (environ 75 \$ US pour le cadre) et ses propriétés en vol plané. Il est facile à piloter et constitue une excellente plateforme pour les pilotes inexpérimentés. Cependant, les planeurs ont des problèmes en cas de vents plus forts (la vitesse maximale du vent jugée sûre lors des essais était de 10 m/s).

La seconde plateforme faite soi-même construite et testée a été la Finwing Penguin (environ 220 \$ US). Cet aéronef a un compartiment de charge utile dédié (avec quelques modifications, il peut s'adapter à un Sony A6000, poids : 468 g, dimension : 120 x 67 x 45 mm) et peut transporter jusqu'à 900 g de charge utile (instructions du fabricant). Le poids total de l'aéronef ne doit pas dépasser 2,4 kilogrammes. La construction de cet aéronef a été facile et rapide. Par rapport au BlitzRCWorks Skysurfer Pro, qui était également à son poids maximal, le Pingouin Finwing semblait voler plus facilement. Ses pièces sont plus robustes que celles du BlitzRCWorks Skysurfer Pro et l'aéronef a donné de meilleurs résultats lors des essais. Puisqu'il s'agit d'un planeur, les vents forts demeurent un problème, mais il était encore facile de le faire voler dans des vents de 10 m/s (vent à 2 m d'altitude, n'a pas été mesuré à une altitude supérieure de 50 à 70 m) en mode de vol assisté et son contrôle était acceptable en mode de vol manuel.

Un résumé des avantages et des inconvénients des différentes plateformes faites soi-même testées figure dans le tableau 3. La figure 5 montre des photos des différentes plateformes.

### Composants électroniques

Les composants électroniques sont exposés au froid pendant le transport vers le site et les vols eux-mêmes. Pour garantir le bon fonctionnement d'un aéronef dans des conditions de froid, tous les composants

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des plateformes de UAS disponibles sur le marché testées.

|               | DJI Phantom 3 Professional                 | BlitzRCWorks Skysurfer Pro          | Finwing Penguin                     |
|---------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Inconvénients | Disponible sur le marché                   | Bon marché                          | Facile à piloter                    |
|               | Rapport prix/performance                   | Facile à piloter                    | Baie de chargement                  |
|               | Résultats rapides                          |                                     | Un moteur plus fort                 |
| Avantages     | Système fermé                              | Capacité limitée de la charge utile | Légèrement plus cher                |
|               | Difficultés liées aux températures froides | Sous-pouvoirs                       | Capacité limitée de la charge utile |
|               |  | Difficultés dans le vent            |                                     |





Figure 5 : De gauche à droite : BlitzRCWorks Skysurfer Pro, Finwing Penguin, intérieur du Finwing Penguin, et le DJI Phantom 3 Professional.

électroniques ont été testés dans un congélateur contrôlé. Il s'agit d'un test distinct de celui des batteries, puisque celles-ci sont entreposées dans des conditions chaudes. Pour les expériences, les pièces électroniques ont été laissées dans le congélateur à la température indiquée pendant au moins une heure. La figure 6 montre le câblage des composants électroniques testés.

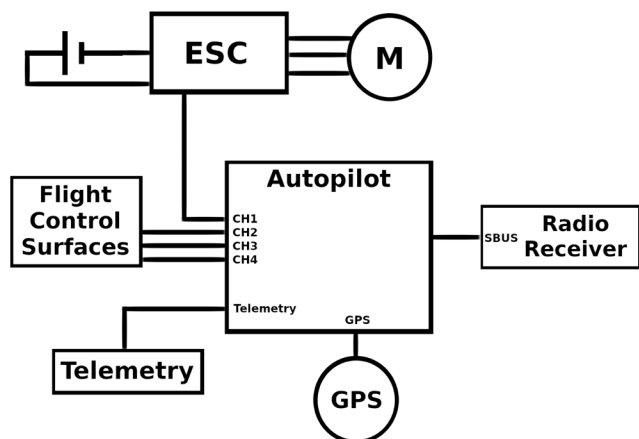


Figure 6 : Schéma de câblage des composants électroniques des modèles de UAS à construire soi-même.

Ce test n'a pas été réalisé pour la DJI Phantom 3 Professional (la plateforme de référence, disponible sur le marché), car sa portée opérationnelle a été fournie par le fabricant (DJY, 2015). Le tableau 4 présente le UAS X-UAV Talon à titre de référence, mais cette plateforme n'a pas encore été utilisée sur le terrain. Les caméras n'ont pas non plus été testées, car elles ne sont pas indispensables à la sécurité des vols.

## Résultats et discussion

Comme le montre le tableau 4, la plage de température opérationnelle des aéronefs diffère. Comme le BlitzRCWorks Skysurfer Pro a cessé de fonctionner à  $-5^{\circ}\text{C}$ , les tests n'ont pas été poursuivis en dessous de cette limite. De même, les tests pour le Finwing Penguin et le X-UAV Talon n'ont pas été réalisés au-dessous de  $-15^{\circ}\text{C}$ , car il avait déjà été démontré qu'ils étaient opérationnels jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$  et avec des limitations à  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Le BlitzRCWorks Skysurfer Pro ne peut être utilisé qu'à des températures supérieures à zéro, car le variateur de vitesse électronique cesse de fonctionner en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Le variateur de vitesse électronique contrôle directement le moteur et est donc essentiel pour le vol automatisé. Il est toujours possible de réaliser des vols manuels pendant les campagnes sur le terrain. Ces vols ont été effectués entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $-30^{\circ}\text{C}$ . Le Finwing Penguin et le X-UAV Talon ont démontré qu'ils étaient pleinement opérationnels jusqu'à  $-40^{\circ}\text{C}$ , mais qu'à  $50^{\circ}\text{C}$ , les servomoteurs qui contrôlent le tangage, le lacet et le roulis ont une portée de mouvement réduite. Selon ces résultats, les deux aéronefs peuvent être pilotés à des températures avoisinant les  $-40^{\circ}\text{C}$ . Ce test a également montré que les autres composants comme le GPS, le module de télémétrie, le récepteur radio et le pilote automatique (dans ce cas-ci Pixhawk 2) sont fonctionnels dans les températures testées.

## Capteurs montés

À ce jour, deux types de caméras uniquement ont été utilisés dans la conception du système de UAS à

construire soi-même. Le principal système de caméra utilisé pendant le travail sur le terrain est un GoPro 6. En plus de sa conception robuste et étanche, la GoPro 6 peut être utilisée à des températures avoisinant -30 °C pendant deux vols et toute la préparation (environ 1 heure). L'autre caméra utilisée est la caméra usuelle installée sur le Phantom 3 Professional de DJI. Cette caméra a été utilisée lors des missions d'été et a donné des résultats fiables, qui sont présentés dans le chapitre suivant. Une petite caméra (MAPIR Survey 3, environ 50 g, 59 x 41,5 x 36 mm) et un petit système de radar à ondes continues modulées en fréquence en bande Ka (environ 700 g, 200 x 130 x 150 mm) seront montés sur le UAS de conception fait soi-même en 2019-2020. Le système radar a déjà été utilisé lors de travaux sur le terrain à des températures avoisinant -40 °C et n'a montré aucun signe de limitation liée au froid. Il sera

utilisé pour le prélèvement d'épaisseur de neige et de glace à l'aide de UAS (Pomerleau et al., 2018).

### Sommaire et aperçu

La possibilité d'adapter des UAS spécifiques à tous les besoins, de modifier les cadres et de réutiliser les composants électronique rend l'approche fait soi-même intéressante pour les groupes de recherche de taille moyenne qui peuvent se permettre la main-d'œuvre nécessaire pour construire ce type de système. L'approche fait soi-même permet également une grande indépendance sur le terrain s'il est nécessaire d'effectuer des réparations et des dépannages, ce qui est un avantage. Avec l'émergence des nouvelles technologies, les cadres deviendront obsolètes ou seront améliorés. Pouvoir s'adapter à ces changements à faible coût pour chaque système de UAS est l'un des

Tableau 4 : Résultats des tests sur les composants électroniques dans des conditions de froid extrême. Le « X » signifie que le dispositif électronique a échoué au test, le crochet que le test a réussi et le crochet entre parenthèses que le dispositif électronique a continué à fonctionner, mais à une capacité réduite.

| Modèle                         | Temp. (°C) | ESC/armement | Servo | Commentaire  |
|--------------------------------|------------|--------------|-------|--|
| BlitzRCWorks Sky<br>Surfer Pro | 0          | ✓            | ✓     |  |
|                                | -5         | X            | ✓     |  |
|                                | -10        | X            | ✓     |  |
|                                | -15        | X            | ✓     |  |
|                                | -20        | X            | ✓     |  |
|                                | -30        | X            | ✓     |  |
|                                | -40        | Na           | Na    | Les tests n'ont pas été poursuivis                 |
| -50                            | Na         | Na           |       |  |
| Finwing Penguin                | -10        | Na           | Na    | Tests non réalisés                                 |
|                                | -15        | Na           | Na    |  |
|                                | -20        | ✓            | ✓     |  |
|                                | -30        | ✓            | ✓     |  |
|                                | -40        | ✓            | ✓     |  |
|                                | -50        | ✓            | (✓)   | Les servos ne se déplacent pas dans toute la gamme |
| X-UAV Talon                    | -10        | Na           | Na    | Tests non réalisés                                 |
|                                | -15        | Na           | Na    |  |
|                                | -20        | ✓            | ✓     |  |
|                                | -30        | ✓            | ✓     |  |
|                                | -40        | ✓            | ✓     |  |
|                                | -50        | ✓            | (✓)   | Les servos ne sont pas à la hauteur                |

plus grands avantages de l'approche fait soi-même. Pour plus d'informations sur notre construction et nos composants électroniques, voir l'annexe E.

### Activités générales

- Une imprimante 3D est utilisée pour personnaliser davantage les charges utiles et les aspects généraux de l'aménagement « intérieur » du système de UAS fait soi-même. Plusieurs pièces peuvent être commandées en ligne ou être conçues rapidement. L'acide polyactique s'est révélé être un matériau adéquat dans la plupart des circonstances, mais un matériau écologique, l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), a été utilisé dans la plupart des cas. Les pièces en plastique imprimées en 3D étaient moins fragiles que prévu.
- Il faut au moins 30 minutes pour atteindre les sites de recherche en motoneige. Ces voyages sont durs pour tout matériel. Comme les expériences de chauffage de l'aéronef n'ont pas bien fonctionné, la meilleure pratique actuelle consiste à laisser le cadre refroidir et à simplement le protéger en vue du trajet difficile. Puisque certaines colles (par exemple, le dessous des bandes Velcro) perdent de leur adhérence dans le froid, il est préférable d'utiliser un montage mécanique lorsque cela est possible.
- Les expériences ont également démontré qu'il est important de garder les batteries chaudes jusqu'au dernier moment. Au départ, des batteries de 4 000 mAh ont été utilisées. Après avoir réalisé la série de tests, des batteries de 5 200 mAh ont été principalement utilisées. Ce changement accroît le poids et diminue la capacité de charge utile pour les capteurs, mais le temps de vol supplémentaire qui en résulte compense cela.
- Bien que des atterrissages difficiles puissent se produire, les rayures de surface peuvent être facilement réparées avec du ruban adhésif Tuck, de la super-colle et de l'époxy.

### Travaux et projets futurs

Au début du développement du UAS, il était nécessaire de prendre le contrôle manuel de l'aéronef à plusieurs reprises (panne du variateur de vitesse électronique, réglages du pilote automatique, etc.). Ces problèmes ont été résolus lors des campagnes du printemps et de l'été 2019 et le pilote automatique fonctionne

désormais très bien. Pour les missions de vol dans des conditions d'hiver polaire, des UAS à voilure fixe seront utilisés pour la plupart du temps, sauf en cas de besoins particuliers (par exemple, vol stationnaire et vols à basse altitude pour les mesures radar). Le projet de construction d'un quadricoptère à la fin de 2019 permettra de réaliser des vols avec le nouveau système radar FMCW. Un autre projet futur consistera à accroître la flexibilité de la charge utile.

Des travaux sont également en cours pour mettre au point un système de montage qui supportera à la fois les systèmes artisanaux et les systèmes en vente sur le marché avec un petit adaptateur propre au UAS. Le fait de pouvoir monter des charges utiles indépendantes sur n'importe quel système permettra aux scientifiques de mener des recherches plus efficacement. En 2019, plusieurs UAS de série à prix raisonnable (par exemple, le Phantom 4 RTK et le Matrice 600 Pro de DJI, qui coûtent tous deux moins de 10 000 \$ US) ont été mis en marché. Le grand avantage des nouveaux UAS disponibles sur le marché est qu'ils sont prêts à l'emploi, ce qui permet aux utilisateurs inexpérimentés d'obtenir des résultats acceptables en très peu de temps. Cependant, les utilisateurs inexpérimentés ont généralement une compréhension moindre du fonctionnement du UAS et peu d'expérience en vol manuel, ce qui est préoccupant, puisque les missions se déroulent dans un environnement difficile, qui ajoute beaucoup de stress en raison de ses conditions naturelles.

### Utilisations du UAS : Prélèvement de la profondeur de la neige

Cette rubrique démontre les capacités de la conception du système de UAS fait soi-même de ce projet pour prélever l'épaisseur de la neige dans l'Arctique. La technique utilisée pour prélever l'épaisseur de neige par des UAS est basée sur la méthode de structure en mouvement décrite ci-après. Cette technique est largement utilisée par les scientifiques et les arpenteurs (Fernandes et al., 2018). À partir de ce flux de travail, des cartes topographiques précises sont obtenues et peuvent être utilisées à de nombreuses fins, notamment pour constater l'évolution temporelle des glissements de terrain (Turner et al., 2015) et pour la reconstruction d'un bâtiment historique (Murtiyoso et al., 2017).

Tableau 5 : Description des MNS pour les vols d'été et d'hiver. Les deux vols ont été effectués en mode manuel.

| DSM               | UAS   | Vol  |  |                        |
|-------------------|---|--|--|------------------------|
| Neige (hiver)     | BlitzRCWorks Sky Surfer Pro<br>Voilure fixe | Mode : Manuel<br>Zone : 40 000 m <sup>2</sup>  | Nb images<br>Resolution (DSM)<br>Altitude                  | 548<br>6 cm<br>20-50 m |
| Vol               | 1<br>2                                      | Date<br>2018-04-23<br>2018-04-26               | Superficie (m <sup>2</sup> )<br>20 000<br>20 000           |                        |
| Déneigement (été) | DJI Phantom 3 Professional<br>Multi rotor   | Mode : Manuel<br>Zone : 40 000 m <sup>2</sup>  | Nb images<br>Résolution (DSM)<br>Altitude                  | 709<br>4 cm<br>50 m    |
| Vol               | 1<br>2<br>3                                 | Date<br>2018-07-11<br>2018-07-17<br>2018-07-25 | Superficie (m <sup>2</sup> )<br>10 000<br>10 000<br>20 000 |                        |

## Introduction

Les différentes profondeurs de la neige sont dérivées de la différence entre deux cartes topographiques. La façon la plus précise de calculer l'épaisseur de la neige est d'utiliser un modèle numérique de surface (MNS), où un modèle de surface est acquis en été (neige-état zéro) et un autre en hiver (neige-état en cours). Cette technique a été utilisée pour la cartographie de l'épaisseur de la neige dans les régions alpines (par exemple, par Bühler et al., 2016 ; De Michele et al., 2016 ; et Eckerstorfer et al., 2015). Il n'existe toutefois que très peu d'études pour les régions Arctiques :

- Nolan et al., (2015) ont cartographié l'épaisseur de la neige en Alaska avec un aéronef, en utilisant une structure en mouvement dotée d'un appareil photo grand public. Ils sont parvenus à obtenir une précision de l'épaisseur de la neige Arctique de 10 cm lorsque les influences de la végétation et d'autres facteurs ont été minimisées.
- Cimoli et al., (2017) ont cartographié l'épaisseur de la neige au Svalbard et au Groenland à l'aide de UAS, mais ont utilisé un MNS terrestre pour recueillir des conditions de neige à l'état zéro en été. Ils ont mesuré une fourchette d'écart-type de 5 à 18 cm pour des sites multiples.

- Bühler et al., (2016) ont cartographié l'épaisseur de neige en terrain alpin avec des UAS. Leur étude démontre que les structures en mouvement fonctionnent pour calculer l'épaisseur de neige en terrain alpin avec une précision acceptable, avec un écart-type de 0,07 m à 0,15 m dans les prairies et un écart-type de moins de 0,3 m dans les zones avec des buissons ou des herbes hautes.

Le flux de travail de la structure en mouvement utilise plusieurs images pour créer une reconstruction en 3D. La première étape consiste à trouver les caractéristiques (ou points d'attache) qui apparaissent dans plusieurs images. Ces points sont trouvés en utilisant l'algorithme de détection SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004). Une première reconstruction 3D peut être effectuée en utilisant les paramètres estimés de la caméra (position et orientation), ce qui donne un nuage de points 3D. Ce processus est optimisé par l'utilisation d'un ajustement par faisceaux (Granshaw, 1980).

## Utilisation des prélèvements d'épaisseur de la neige

Dans le cadre de ce projet, des points d'appui au sol avec des positions connues ont été utilisés pour affiner les paramètres de la caméra et fournir un référentiel GPS pour le nuage de points. Ce projet a utilisé la version 1.4.3 de Photoscan d'Agisoft et les points d'appui au sol ont été acquis en utilisant un système

GPS différentiel (dGPS) constitué d'un Trimble Net R9 avec une antenne géodésique Trimble Zephyr comme station de base, et d'un récepteur u-blox comme rover. Un point à la station de base a été mesuré à partir d'une acquisition statique de 5 heures, avec un intervalle d'échantillonnage d'une seconde. La position a ensuite été affinée à l'aide du Positionnement Ponctuel Précis (PPP) de Ressources naturelles Canada.

L'exactitude relative des cibles est de 0,5 cm sur les axes X et Y et de 1 cm sur l'axe Z. Il s'agit de la précision du logiciel dGPS utilisé (EZSurv version 3.98.374 de Effigis Geo Solution), mais la précision absolue du positionnement dépend du résultat PPP de la station de base (X, Y, Z) = (2, 3, 5 cm). L'erreur de positionnement absolu est importante lorsque deux ensembles de mesures sont comparés, par exemple pour différencier deux MNS, alors que le positionnement relatif fait référence à la précision au sein de chaque ensemble. Par exemple, la précision des points d'appui au sol précisés dans le logiciel Agisoft Photoscan lors du calcul du MNS est liée au positionnement. La précision absolue, en revanche, aurait un impact sur l'erreur globale de la carte d'épaisseur de la neige.

L'un des principaux problèmes est le lien avec la précision absolue de la station de base. La station de base n'était pas fixée sur le même point pendant les vols d'hiver et ceux d'été, ce qui entraînait plus d'incertitudes quant à son positionnement. Une tige a été enfoncée dans le sol afin de créer un point statique pour les futures campagnes sur le terrain. Le risque que la tige soit déchaussée en raison de la turbation périglaciaire reste faible dans cette région. Il sera important d'installer la station de base pour les vols d'hiver et d'été sur ce point afin de pouvoir éliminer l'erreur absolue de positionnement. Il a été nécessaire d'effectuer une correction en ajoutant 10 cm au MNS hivernal à partir d'une zone sans neige connue dont l'épaisseur de neige était négative. Cette zone sans neige était à peine couverte de neige, mais des rochers étaient clairement visibles. L'épaisseur moyenne de neige de cette petite zone était de -13 cm, c'est pourquoi une correction de 10 cm a été appliquée à l'ensemble de la carte d'épaisseur de la neige (c'est-à-dire le MNS d'hiver). Là encore, comme la station de base n'a pas été fixée sur le même point, ce décalage est du même ordre de grandeur si l'on ajoute l'incertitude des deux points ( $z = 5$  cm) au résultat du PPP. La zone sans neige peut améliorer l'inscription des deux MNS (Nolan et al., 2015).

Un MNS total a été interprété en fusionnant plusieurs zones de vol étudiées sur une période de 2 à 3 jours (voir tableau 5). La réalisation de mesures de validation à partir d'un prélèvement de neige prend du temps. Elles ont été effectuées immédiatement après chaque vol, ce qui limite le nombre de vols par jour. Les dates des différents vols figurent dans le tableau 5. Les différentes conditions de lumière ne sont pas optimales car elles induisent une erreur dans le processus de reconstruction 3D en raison du flux de travail de la structure en mouvement et doivent être prises en compte. Des mesures manuelles de la profondeur de la neige ont été effectuées pour valider le MNS à l'aide d'une sonde à avalanche, géolocalisée par l'antenne dGPS. Fait à noter, les GPS portables typiques des nouveaux appareils, comme la Magnaprobe (Sturm, 2018), n'ont pas une précision X, Y, Z suffisante puisque la taille des pixels MNS est d'environ 5 cm. Ces mesures ont été effectuées avec la sonde d'avalanche couplée au même système dGPS utilisés pour les points d'appui au sol. Cette méthode offre une excellente correspondance entre les points validation et la carte produite par UAS. Considérant la très grande variabilité spatiale de l'épaisseur de la neige et la résolution des pixels d'environ 4 à 6 cm prélevés par une structure en mouvement, une telle précision est essentielle.

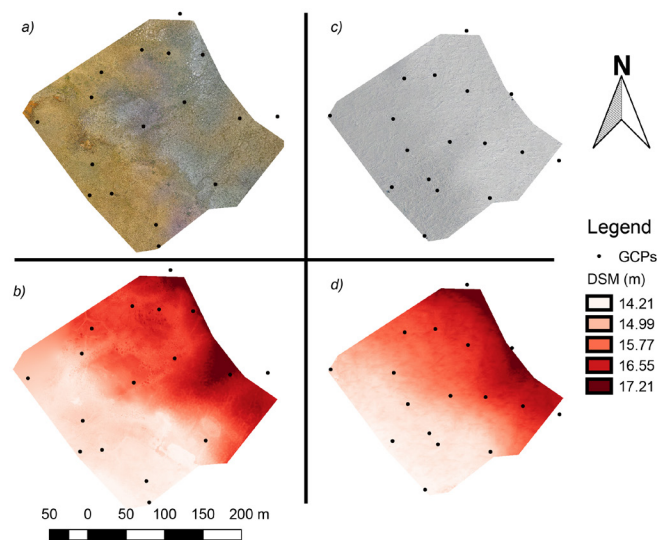


Figure 7 : Orthophotographie et images MNS du site d'étude près de Cambridge Bay (69°13'19,66" N, 104°53'54,91" O). La partie supérieure gauche (a) montre l'orthophotographie du vol d'été avec plus de végétation sur la gauche et plus de rochers sur la droite. La partie inférieure gauche (b) montre le MNS résultant du vol d'été. Sur le côté droit, (c) et (d) illustrent les résultats des orthophotographies et du MNS pour les vols d'hiver.

Au total, 155 points de validation (voir Figure 8) ont été pris et sont répartis sur la surface cartographiée de 40 000 m<sup>2</sup>. Pour plus de renseignements sur le site de l'étude, voir l'annexe B.

## Résultats et discussion

Le logiciel Agisoft Photoscan a été utilisé pour traiter toutes les images. La figure 7 montre à la fois le MNS et l'orthophotographie des conditions d'enneigement et de déenneigement. La résolution du MNS est de 4 cm pour le vol d'été et de 6 cm pour le vol d'hiver. Un total de 18 points d'appui au sol (voir la figure 7) ont été utilisés pour optimiser les paramètres et les positions des caméras. Aucun point d'appui au sol n'étant disponible pour une validation externe, il n'est pas possible de fournir une estimation externe de la précision du MNS. L'erreur par point d'appui au sol est de 8 cm en moyenne (voir l'annexe D) et est donc intrinsèque à l'optimisation car elle réduit la différence entre la position réelle du point d'appui au sol et la position du point d'appui au sol sur le nuage de points en optimisant les paramètres de la caméra (plus de détails sur les points d'appui au sol se trouvent aux annexes A et D). À l'avenir, le UAS de conception fait soi-même sera doté d'un système dGPS qui fournira une solution permanente (précision cinématique en temps réel) pour toutes les photos prises pendant le vol. Cela permettra d'utiliser la plupart des points d'appui au sol pour évaluer la précision du MNS et de laisser 3 à 4 points au sol pour l'optimisation (s'il y a lieu). Cette mesure est nécessaire pour maximiser la précision et la fiabilité du MNS et pour détecter les erreurs systématiques (James et al., 2017 ; Goetz et al., 2018).

Sur la figure 7 (a), on peut voir une zone de végétation à l'ouest et un terrain plus rocheux à l'est. La végétation est caractérisée par des arbustes et des cypéracées, plus précisément des *Salix richardsonii* et des *Carex aquatilis*. Cela a une incidence sur la précision de la carte de l'épaisseur de la neige, comme le montre la figure 8. L'incertitude provient du tassement de la neige sur la végétation, là où la surface estivale du MNS (c'est-à-dire la surface de la végétation) est plus faible sous la neige compactée. Cette conclusion correspond aux valeurs d'écart-type plus élevées enregistrées par Nolan et al. (2015) et Bühler et al. (2016) dans les zones végétalisées. En ce qui concerne le MNS hivernal, il y a une nette influence du vent soufflant sur la neige, ce qui entraîne des bancs de neige compacte (voir l'annexe C pour une orthophotographie en taille réelle).

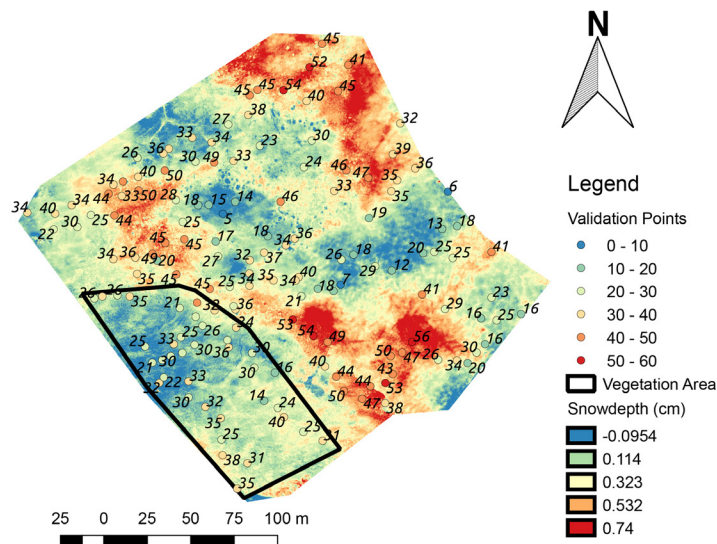


Figure 8 : Carte de l'épaisseur de la neige résultant de l'approche par structure en mouvement. La zone circonscrite en noir montre des résultats négatifs en raison de l'influence de la végétation.

Ces bancs de neige offrent beaucoup de contraste à l'image et permettent de détecter plus facilement des points sur plusieurs images, même si les images sont essentiellement blanches. Certains points d'appui au sol semblent être en dehors du MNS/orthophotographie (Figure 7). Il s'agit d'un effet artificiel, car seules les régions présentant un chevauchement suffisant entre les images sont utilisées pour créer le MNS. Le chevauchement entre les deux MNS est équivalent à la carte d'épaisseur de neige (voir figure 8). La figure 8 montre également qu'il existe 155 points de validation, avec une épaisseur moyenne de neige de 33 cm.

La figure 9 montre la comparaison entre l'épaisseur de neige des points de validation et de la carte dSM\_UAV. La ligne orange représente la meilleure correspondance entre les points de validation et la carte produite par UAS. Les points de validation sur la végétation sont indiqués en rouge et ont été supprimés du deuxième graphique de la figure 9. Les zones de végétation ont été ciblées à l'aide d'une combinaison de photographies provenant de la conception du UAS fait soi-même et d'observations au sol. On peut voir dans le tableau 6 que ces points de végétation ont une incidence sur la corrélation et l'écart-type. L'écart-type général est de 16 cm, ce qui est comparable à la littérature.

Comparativement aux travaux dans les régions alpines ou les environnements de toundra, le manteau neigeux de l'Arctique près de Cambridge Bay est plutôt faible,

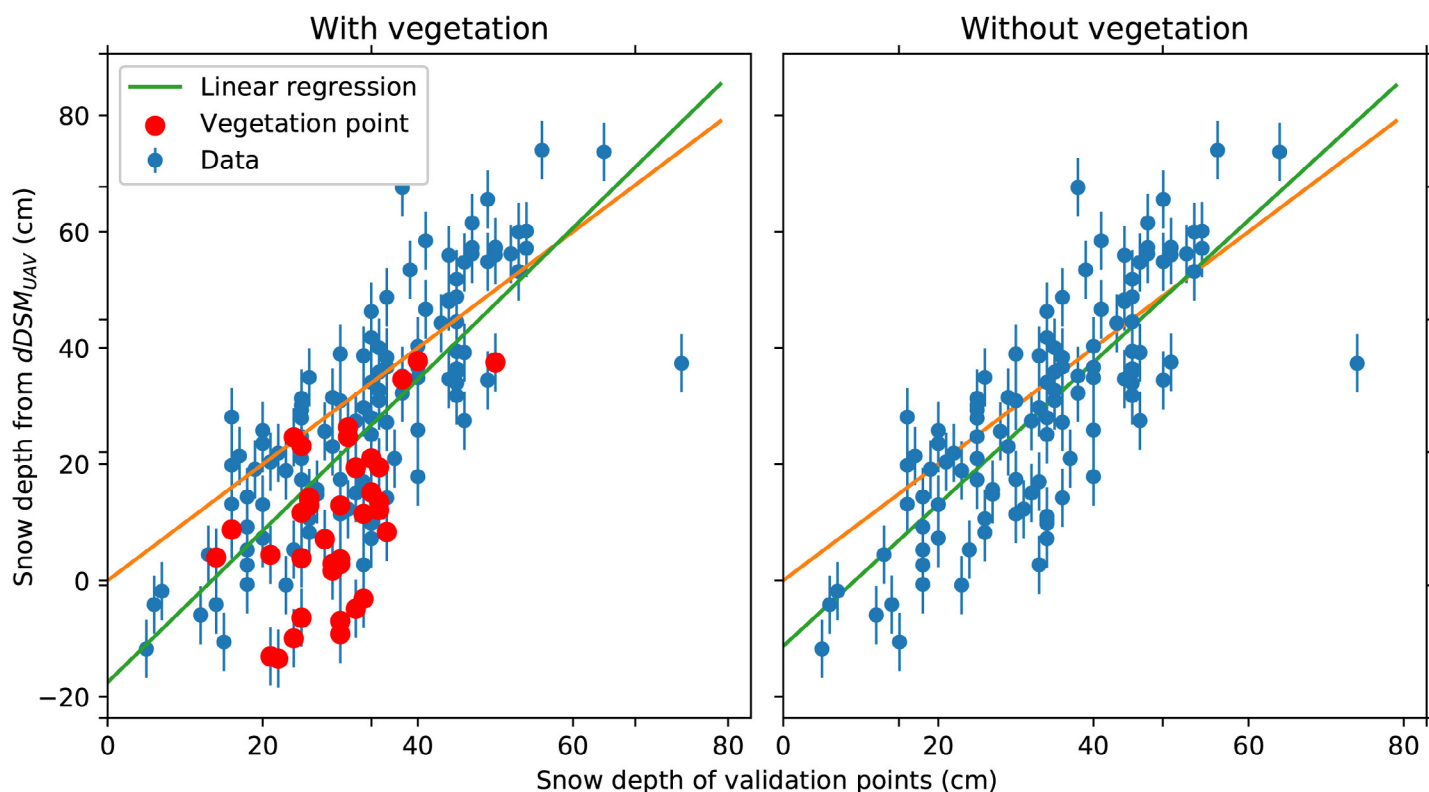


Figure 9 : Régression entre les points de validation de l'épaisseur de la neige et les points d'épaisseur de la neige dérivés du UAS.

avec une moyenne de 33 cm, mesurée au début du printemps (avril 2018). Par conséquent, la microtopographie et la végétation ont une plus grande influence sur la précision de la carte. La manipulation et le traitement du système mondial de navigation par satellite (GNSS) pourraient être améliorés (comme expliqué précédemment) par la correction de 10 cm de décalage appliquée au MNS d'hiver. D'autres améliorations seront également possibles en passant des vols manuels aux vols automatisés, car une altitude constante et un chevauchement constant augmenteront l'uniformité du nuage de points. De plus, le réglage

Tableau 6 : Paramètres de régression linéaire et écart-type à partir des points de validation de l'épaisseur de la neige.

|               | Avec végétation | Sans végétation |
|---------------|-----------------|-----------------|
| a             | 1.30            | 1.22            |
| b             | -18             | -11             |
| No. de points | 155             | 118             |
| RMSE          | 16 cm           | 13 cm           |
| R2            | 0.57            | 0.64            |
| valeur-p      | 2.14 e-30       | 1.66 e-27       |

de la caméra sur des paramètres fixes et des zones de vol le même jour permettra d'obtenir des conditions de lumière constantes et réduira les incertitudes de reconstruction du nuage de points (Bühler et al., 2017). Une caméra à plus haute résolution sera également testée pour obtenir de meilleurs résultats MNS (voir l'annexe A pour plus de renseignements sur la caméra).

## Conclusions

Ce projet visait à construire un aéronef capable de voler dans les conditions hivernales du Nord, c'est pourquoi l'accent a été mis sur les tests de matériaux dans un contexte de températures froides. Les batteries et les composants électroniques ont été testés à différentes températures afin de comprendre leurs limites avant de les utiliser sur le terrain. Au départ, il n'y avait pas de préférence de batterie. Dans le cadre de ces expériences, des batteries de tailles et de formes différentes ont été achetées pour ce projet et pour d'autres utilisations, comme l'alimentation du système radar. Le fait de pouvoir disposer d'une variété de batteries est utile et permet de choisir la batterie en fonction des exigences de la mission. Les UAS à voilure fixe de conception fait soi-même sont proches de leur

charge utile maximale, c'est pourquoi des batteries un peu plus petites sont préférées pour ces missions. En revanche, le quadricoptère, qui doit encore être construit, bénéficiera d'une plus grande capacité de charge, de sorte que la taille de la batterie aura moins d'importance.

Actuellement, un aéronef supplémentaire de type Finwing Penguin a été acheté. Il est doté d'un moteur plus puissant que le BlitzRCWorks Skysurfer Pro et est plus facile à faire voler dans le vent, à préparer et à entretenir sur le terrain. Les prochaines étapes consisteront à concevoir et à construire un quadricoptère pour le système radar. Actuellement, un système capable de voler relativement bas et lentement est nécessaire. Un planeur peut assurer ce dernier, mais les vols à basse altitude (moins de 5 m) sont trop risqués. De plus, la capacité de vol stationnaire permettra de viser plus facilement les mesures du nadir. De petites déviations se produiront et l'équipe de recherche devra décider s'il faut les contrer avec un gyroscope ou un accéléromètre électronique. Le second a l'avantage d'être plus léger, le premier d'atteindre réellement le nadir. En outre, le fait de travailler plus fréquemment sur la plateforme X-UAV Talon permettra à l'avenir des vols à des vitesses de vent plus élevées.

En termes d'applications scientifiques, la prochaine étape intuitive consiste à ajouter l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) à la carte d'épaisseur de neige. Cela permettra d'établir une relation empirique entre le biais de l'épaisseur de la neige et le type de végétation et pourrait également conduire à une analyse plus précise de l'interaction entre la neige et les arbustes (Sturm et al., 2001). Une analyse de la micro-topographie est également prévue. Elle utilisera un indice topographique, comme un indice de pente au vent, associé au vent dominant pour mieux comprendre les processus de redistribution de la neige (Winstral et al., 2002). Cette analyse peut être utile pour les travaux thermiques du sol. Ce type de carte est assez rare dans l'Arctique compte tenu de toutes les contraintes logistiques mises en évidence dans ce travail. Malgré la rareté des données disponibles à ce jour, les futures informations sur l'épaisseur de la neige à haute résolution seront utiles pour l'hydrologie (moment de la fonte, processus géochimiques), le pergélisol (surveillance de la couche active) et l'écologie (caractérisation de l'habitat). De nombreux processus physiques à ce niveau influencent les processus à plus grande échelle, et des cartes détaillées de distribution

de la neige pourraient être utilisées pour analyser la variabilité inférieure au pixel des modèles de neige ou les prélèvements d'état de surface (c'est-à-dire l'équivalent en eau de la neige) dérivés d'images satellites à résolution grossière.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier David Rancourt et Alexis Lussier-Desbiens pour leur formation et leur soutien dans la construction et la modification de nos cadres. Leurs connaissances et leur expérience dans la conception de UAS ont contribué de manière significative au succès de nos vols. Ce projet a été financé par Savoir polaire Canada, le Conseil national de recherches en sciences et en génie du Canada (CRSNG) et le Fonds Québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FRQ-NT). Nous remercions tout particulièrement le personnel de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) et la communauté de Cambridge Bay, au Nunavut, pour leur formidable soutien logistique pendant les campagnes sur le terrain.

## Annexe A

Description des deux caméras utilisées pour la création de la carte de l'épaisseur de la neige. La GoPro 6 a dû être utilisée en mode linéaire pour éviter la distorsion en œil de poisson de ce type de caméras d'action qui réduit la résolution. Des vidéos ont également été enregistrées et testées (au lieu de photographies) pendant le vol, ce qui a entraîné une perte de résolution spatiale et un post-traitement beaucoup plus lourd.

## Annexe B

Voici une carte qui montre le site d'étude à Cambridge Bay, Nunavut, Canada. Le site d'étude est plus précisément situé dans le bassin versant du lac Greiner.

## Annexe C

Vue d'ensemble des orthophotographies pour les vols d'avril où on peut observer les configurations spatiales de la neige causées par le vent. La zone en noir est la zone sans neige utilisée pour appliquer la correction de 10 cm expliquée dans la rubrique sur l'utilisation du prélèvement de la profondeur de la neige.



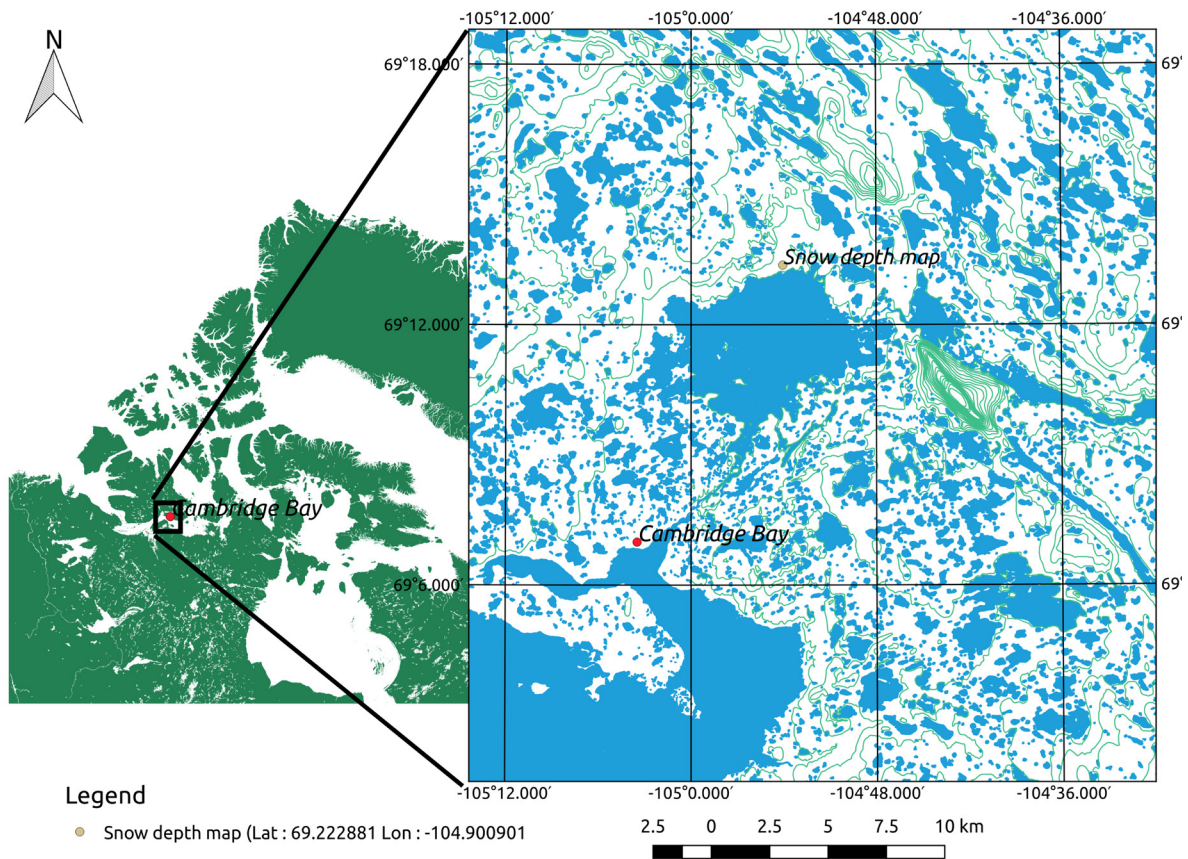


Figure 10 : Carte du site d'étude du bassin versant du lac Greiner.

## Annexe D

Points d'appui au sol avec leur précision de localisation par rapport au système GPS et la différence (erreur (m)) entre la position et le modèle 3D. Seuls les points d'appui au sol d'été sont présentés, car la précision en hiver et en été est semblable.

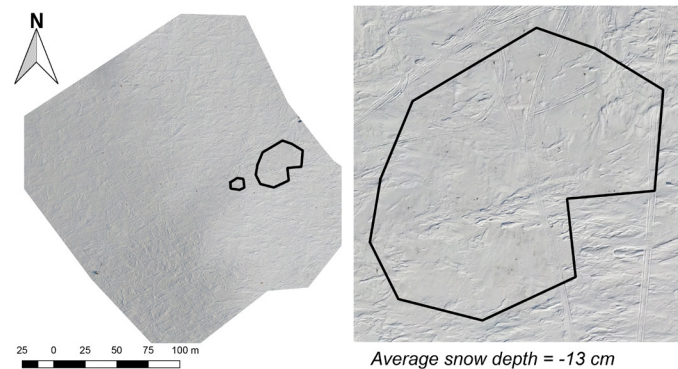


Figure 11 : Ortophotographies des vols d'avril.

## Annexe E

Les composants de la conception du système de UAS fait soi-même peuvent être séparés en deux catégories différentes :

1. La mécanique, le cadre étant le UAS lui-même (dans ce cas, un cadre à ailes fixes); et
2. L'électronique, soit tous les composants électroniques internes (reliés à l'autopilote).

L'un des avantages de l'approche fait soi-même est la possibilité de réutiliser ou d'utiliser à d'autres fins l'électronique pour différents UAS (y compris ceux à voilure fixe et tournante).

| Markers            | Easting (m)   | Northing (m)   | Altitude (m) | Accuracy (m)             | Error (m) | Projections | Error (pix) |
|--------------------|---------------|----------------|--------------|--------------------------|-----------|-------------|-------------|
| ✓ 101              | 503990.002000 | 7679155.692000 | 14.802000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.028189  | 11          | 0.365       |
| ✓ 102              | 503924.449000 | 7679084.147000 | 14.112000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.048929  | 12          | 0.767       |
| ✓ 103              | 503921.187000 | 7679108.808000 | 14.281000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.058068  | 14          | 0.515       |
| ✓ 104              | 503869.852000 | 7679144.885000 | 14.388000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.225831  | 10          | 0.589       |
| ✓ 105              | 503844.497000 | 7679142.810000 | 14.362000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.111675  | 13          | 0.335       |
| ✓ 106              | 503906.737000 | 7679222.762000 | 15.545000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.055086  | 4           | 0.135       |
| ✓ 201              | 503844.516000 | 7679142.837000 | 14.365000    | <b>0.006/0.016</b>       | 0.118750  | 12          | 0.257       |
| ✓ 202              | 503906.727000 | 7679222.769000 | 15.551000    | <b>0.005/0.006/0....</b> | 0.050462  | 16          | 0.255       |
| ✓ 203              | 503847.647000 | 7679178.554000 | 14.611000    | <b>0.006/0.007/0....</b> | 0.029599  | 11          | 0.399       |
| ✓ 204              | 503784.159000 | 7679227.752000 | 14.868000    | <b>0.006/0.007/0....</b> | 0.106292  | 13          | 0.387       |
| ✓ 205              | 503846.518000 | 7679256.293000 | 15.020000    | <b>0.006/0.007/0....</b> | 0.148801  | 13          | 0.166       |
| ✓ 206              | 503857.960000 | 7679285.157000 | 15.722000    | <b>0.006/0.007/0....</b> | 0.083373  | 11          | 0.321       |
| ✓ 307              | 503904.894000 | 7679311.262000 | 16.051000    | <b>0.006/0.007/0....</b> | 0.065924  | 11          | 0.424       |
| ✓ 308              | 503949.014000 | 7679352.993000 | 17.370000    | <b>0.005/0.006/0....</b> | 0.027096  | 10          | 0.326       |
| ✓ 309              | 503935.949000 | 7679307.399000 | 16.135000    | <b>0.005/0.006/0....</b> | 0.080173  | 14          | 0.435       |
| ✓ 310              | 503975.339000 | 7679305.502000 | 16.586000    | <b>0.005/0.006/0....</b> | 0.056571  | 18          | 0.146       |
| ✓ 403              | 503954.077000 | 7679250.819000 | 15.961000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.034524  | 11          | 0.311       |
| ✓ 404              | 504018.222000 | 7679231.977000 | 16.939000    | <b>0.005/0.013</b>       | 0.024358  | 27          | 0.179       |
| ✓ 405              | 503975.348000 | 7679305.466000 | 16.591000    | <b>0.005/0.012</b>       | 0.063655  | 30          | 0.198       |
| ✓ 406              | 504061.918000 | 7679233.983000 | 16.859000    | <b>0.005/0.013</b>       | 0.069560  | 13          | 0.240       |
| <b>Total Error</b> |               |                |              |                          |           |             |             |
| Control points     |               |                |              |                          | 0.088421  |             | 0.353       |
| Check points       |               |                |              |                          |           |             |             |

Figure 12 : Renseignements détaillés sur les points d'appui au sol dérivés du MNS d'été.

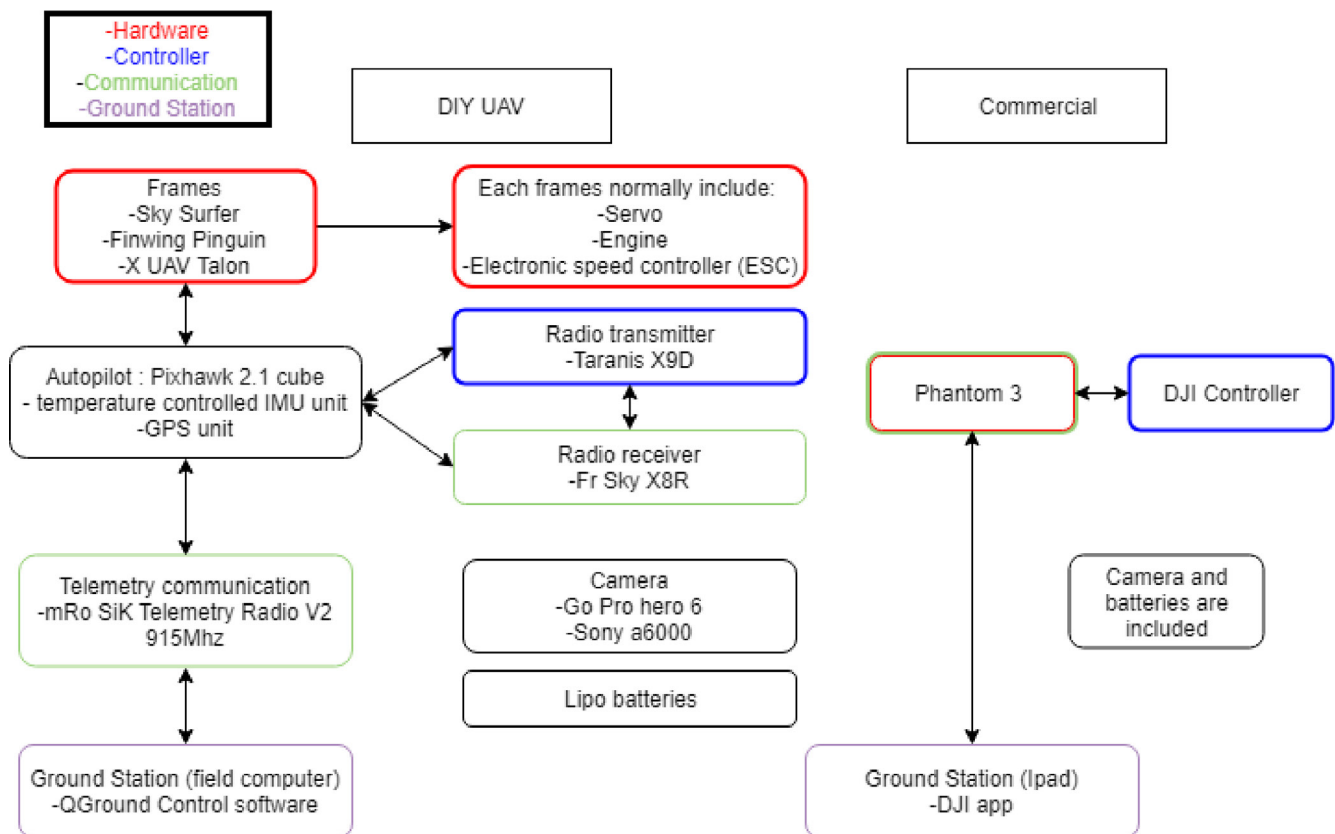


Figure 13 : Composants de la conception d'un système fait soi-même (à gauche) par rapport aux composants commerciaux (à droite).

## Références

- Abdilla, A., Richards, A., Burrow, S. 2015. Power and Endurance Modelling of Battery-Powered Rotorcraft. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Ader, M., Axelsson, D. 2017. Drones in Arctic Environments. Master thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Anderson, K., Westoby, M.J., James, M.R. 2019. Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(2):163–173. Retrieved from: <https://doi.org/10.1177/0309133319837454>.
- Bühler, Y., Adams, M.S., Bosch, R., Stoffel, A. 2016. Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UAS): Potential and limitations. *The Cryosphere*, 10(3):1075–1088.
- Bühler, Y., Adams, M.S., Stoffel, A. Boesch, R. 2017. Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10):1–24.
- Chudley, T.R., Christoffersen, P., Doyle, S.H., Abellan, A., Snooke, N. 2019. High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *The Cryosphere*, 13(3):955–968. Retrieved from: <https://doi.org/10.5194/tc-13-955-2019>.
- Cimoli, E., Marcer, M. Vandecrux, B., Bøggild, C.E., Williams, G., Simonsen, S.B. 2017. Application of Low-Cost Uass and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic. *Remote Sensing*, 9(11):1–29. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/rs9111144>.
- De Michele, C., Avanzi, F., Passoni, D., Barzaghi, R., Pinto, L., Dosso, P., Ghezzi, A., Gianatti, R., Della Vedova, G. 2016. Using a fixed-wing UAS to map snow depth distribution: An evaluation at peak accumulation. *The Cryosphere*, 10:511–522.
- DJI. 2015. Phantom 3 Professional, User manual.
- Eckerstorfer, M., Solbø, S., Malnes, E. 2015. Using “Structure-from-Motion” Photogrammetry in Mapping Snow Avalanche Debris. *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie*, 21:171–178.
- Fernandes, R., Prevost, C., Canisius, F., Leblanc, S.G., Maloley, M., Oakes, S., Holman, K., Knudby, A. 2018. Monitoring snow depth change across a range of landscapes with ephemeral snowpacks using structure from motion applied to lightweight unmanned aerial vehicle videos. *The Cryosphere*, 12(11):3535–3550.
- Goetz, J., Brenning, A., Marcer, M., Bodin, X. 2018. Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *Remote Sensing of Environment*, 210:208–216.
- Granshaw, S.I. 1980. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 10:181–207.
- James, M.R., Robson, S., d’Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U. 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280:51–66.
- Jo, D., Kwon, Y. 2019. Development of Autonomous VTOL UAV for Wide Area Surveillance. *World Journal of Engineering and Technology*, 7(1):227–239. Retrieved from: <https://doi.org/10.4236/wjet.2019.71015>.
- Langlois, A., Royer, A., Goïta, K. 2010. Analysis of simulated and space-borne passive microwave brightness temperatures using in situ measurements of snow and vegetation properties. *Can. J. Remote Sensing*, 36(1):S135–S148.
- Lowe, D.G. 2004. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110.
- Mulgaonkar, Y., Whitzer, M., Morgan, B., Kroninger, C.M., Harrington, A.M., Kumar, V. 2014. Power and weight considerations in small, agile quadrotors. *SPIE Defense+ Security*, pp. 90831Q–90831Q, International Society For Optics and Photonics.

Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P., Freville, T. 2017. Acquisition and processing protocols for UAV images: 3D modeling of historical buildings using photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4:163–170.

Nolan, M., Larsen, C., Sturm, M. 2015. Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry. *The Cryosphere*, 9:1445–1463.

Pomerleau P. 2016. Conception d'un dispositif de caractérisation de la glace et de la neige à partir d'un radar à émission continue. Masters thesis, Université de Sherbrooke.

Rutter, N., Sandells, M., Derksen, C., Toose, P., Royer, A., Montpetit, B., Langlois, A., Lemmetyinen, J., Pulliainen J. 2014. Snow stratigraphic heterogeneity within ground-based passive microwave radiometer footprints: Implications for emission modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(3):550–565. doi:10.1002/2013JF003017.

Salerno, D., Korsunsky R. 1998. Practical considerations in the design of lithium-ion battery protection systems. APEC '98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE. doi: 10.1109/APEC.1998.653975.

Sturm, M. 2018. An Automatic Snow Depth Probe for Field Validation Campaigns. Technical Reports, 9695–9701.

Sturm, M., McFadden, J.P., Liston, G.E., Chapin III, F.S., Racine, C.H., Holmgren, J., Stuart Chapin, F., Racine, C.H., Holmgren, J. 2001. Snow-Shrub Interactions in Arctic Tundra: A Hypothesis with Climatic Implications. *Journal of Climate*, 14(3):336–344.

Turner, D., Lucieer, A., de Jong, S.M. 2015. Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2):1736–1757.

Wang, Q. 2015. Analysing and evaluating a thermal management solution via heat pipes for lithium-ion batteries in electrical vehicles. PhD thesis, University of Nottingham.

Winslow, J., Benedict, M., Hrishikeshavan, V., Chopra, I. 2016. Design, development, and flight testing of a high endurance micro quadrotor helicopter. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 8(3):155–169. doi: 10.1177/1756829316653694.

Winstral, A., Elder, K., Davis, R.E. 2002. Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. *Journal of Hydrometeorology*, 3:524–538.