



Véhicules aériens sans pilote (drones)

Procédure de collecte des données recommandée pour la localisation de sépultures non-marquées

Introduction

Les véhicules aériens sans pilote (UAV en anglais), aussi connus sous le nom de drones, peuvent être utilisés dans la cartographie aérienne des cimetières et des sépultures non-marquées associés aux anciens pensionnats indiens du Canada. Les véhicules aériens sans pilote de type hélicoptère sont les plus utiles dans ce genre de travail puisqu'ils sont plus faciles à manœuvrer en vol. Ces derniers incluent notamment des modèles à quatre hélices, destinés aux consommateurs, ainsi que des modèles plus gros et sophistiqués possédant souvent six ou huit hélices, destinés à un usage professionnel.

Les véhicules aériens sans pilote bon marché sont souvent équipés de caméras intégrées, alors que les modèles professionnels peuvent être équipés de caméras ou de capteurs thermaux, multispectraux ou laser (LiDAR) de manière interchangeable. Les capteurs thermaux détectent les différences dans la température de la surface alors que les capteurs multispectraux (ou hyperspectraux) mesurent la croissance et la santé des différents types de plantes ainsi que la variation de l'humidité du sol. Lorsque certaines conditions sont réunies, ces différents capteurs peuvent être utilisés afin de localiser des sépultures non-marquées.

Les systèmes de LiDAR aériens envoient des impulsions laser vers le sol afin d'en mesurer la distance. Le capteur mesure le temps nécessaire aux millions de points laser pour quitter le véhicule aérien, toucher le sol, puis revenir. Dans leur ensemble, ces informations forment des nuages de points très denses définissant la surface (le couvert végétal et le sol) de manière très précise. Ces nuages de points peuvent être denses au point de permettre la détection de petits monticules ou des dépressions peu profondes causés par la présence de sépultures. Les véhicules aériens sans pilotes bon marché équipés de caméras conventionnelles peuvent également générer des données photogrammétriques utiles, tel qu'illustré dans les exemples ci-dessous. Le logiciel utilisé dans les exemples utilise des images afin de produire des orthophotographies (produites en superposant des photos) et des modèles altimétriques numériques. Dans certains cas, ces modèles altimétriques numériques peuvent révéler des changements subtils de la topographie pouvant être causés par la présence de sépultures. Ces

images géoréférencées peuvent être analysées en détails en utilisant des logiciels de Systèmes d'information géographiques (SIG) (voir le document sur les SIG dans cette série).

La plupart des véhicules aériens sans pilotes sont équipés de capteurs qui leur permettent de voler de manière sécuritaire et stable. Ils sont contrôlés à l'aide d'un système de communication radio bidirectionnel connectant le véhicule et la manette de contrôle au sol. Cette dernière est habituellement liée à une tablette électronique ou un téléphone cellulaire afin de fournir des télémessures et un accès au visuel de la caméra du véhicule. Plusieurs véhicules aériens sans pilote peuvent également être programmés afin de suivre un plan de vol en forme de grille tout en prenant automatiquement des photos qui se recoupent (figure 1). Il est nécessaire de procéder à une préparation appropriée du site et de s'entendre sur le degré de précision des données nécessaires à la réalisation des objectifs de recherche avant le début de l'utilisation du véhicule aérien sans pilote. Ce type de projet de cartographie nécessite également de faire appel à des opérateurs certifiés et à des équipes formées qui respectent les réglementations fédérales entourant l'utilisation de véhicules aériens sans pilote. Ces réglementations sont en place afin d'assurer la sécurité des gens, des biens et des propriétés ainsi que des autres aéronefs.

1) Planification

La planification d'un vol va dépendre des objectifs de cartographie, des dimensions du site, du couvert végétal et du type d'espace aérien. Assumons que l'on veuille utiliser un véhicule aérien sans pilote à quatre hélices équipé d'une caméra conventionnelle dans un espace aérien non contrôlé. Dans ce scénario, le véhicule aérien devrait voler le long de transects à une hauteur et à une vitesse standardisée (figure 1) afin de collecter des images appropriées à une analyse photogrammétrique. Les images sont collectées le long de ces transects à des intervalles qui permettent un chevauchement standardisé entre les images prises de manière consécutive. Ceci est difficile à réaliser en vol manuel, mais l'utilisation de logiciels de planification de vol semi-autonomes facilite la collecte de ce genre de données tout en augmentant leur qualité.

Ce type de logiciel est téléchargé sur la tablette électronique à laquelle est jointe la manette de contrôle du véhicule. Avec une connexion internet, des cartes (souvent Google Earth) fournissent un aperçu du contexte géographique permettant d'identifier la zone de vol. Après avoir assigné l'altitude du vol, le degré de chevauchement des images et la vitesse de vol, le logiciel de planification établit automatiquement des transects de vol (figure 1). Ce plan est ensuite enregistré pour être téléchargé sur le véhicule aérien avant le début du vol, après quoi il s'envolera automatiquement, effectuera l'itinéraire de vol planifié puis reviendra se poser dans la zone d'atterrissage. L'opérateur peut toutefois reprendre le contrôle manuel du véhicule aérien à n'importe quel moment durant le vol. L'altitude de vol optimale varie en fonction de la résolution d'image souhaitée, des dimensions de la zone d'étude ainsi que des obstacles pouvant nuire au véhicule aérien. Des altitudes de vol plus basses génèrent des images de plus haute résolution mais nécessitent un plus grand nombre d'images afin de couvrir

l'ensemble de la zone d'étude. Des vols à plus haute altitude vont pour leur part nécessiter moins de photographies mais produiront des images de plus basse résolution. Plusieurs éléments doivent donc être pris en considération lors du choix de l'altitude de vol. Dépendant du type de caméra utilisé, une altitude de vol de 40 m fournit une résolution d'image d'environ 1,5 cm par pixel, tout en offrant un degré raisonnable de sécurité et d'efficacité.

Les batteries de véhicules aériens sans pilotes électriques leur permettent habituellement de voler pendant 20 à 30 minutes à la fois, après quoi elles doivent être changées et rechargées. Comme la durée de vie des batteries varie en fonction de leur âge, de la température et du vent, il est plus prudent de planifier des vols dont la durée ne dépasse pas les 80% de la durée de vie estimée de la batterie. Utiliser un logiciel de planification de vol permet d'optimiser la collecte de données en survolant des zones de plus petites dimensions à l'aide d'une batterie seulement. Par exemple, voler au-dessus une zone d'environ 1,5 hectares (15 000 m²) à 40 m d'altitude et à une vitesse de 2,4 m/seconde (avec 85% de chevauchement entre les images) va mener à la collecte d'environ 260 images pendant un vol de 15 minutes (une batterie). La résolution de ces images va varier en fonction de la caméra utilisée. Ces 260 images nécessiteront environ 2,18 giga-octets sur la carte micro-SD installée sur le véhicule. Lorsque de plus grandes aires doivent être étudiées, les logiciels de planification de vol semi-autonomes permettent la prise en compte l'utilisation de plusieurs batteries.

2) Préparation du site

La présence de végétation peut compliquer le processus de cartographie aérienne d'un site. L'analyse photogrammétrique ne sera pas totalement efficace si le site est recouvert de forêts, buissons et d'herbes hautes. La réalisation de cartes topographiques pourrait nécessiter l'enlèvement systématique de la végétation afin de rendre le sol visible – ce qui pourrait également être nécessaire avant l'utilisation du radar pénétrant, d'un instrument de mesure de la conductibilité/résistivité électrique ou d'un magnétomètre sur le même site. La préparation du site nécessite beaucoup plus d'efforts que le processus de cartographie aérienne tel quel.

L'utilisation d'un véhicule aérien sans pilote nécessite la présence d'un opérateur (pilote) et d'observateurs. L'opérateur se charge du contrôle du véhicule aérien, alors que les observateurs surveillent le véhicule et avertissent l'opérateur de la présence de tout autre véhicule aérien ou d'obstacles et dangers d'autre type. Il est essentiel de déterminer le statut de l'espace aérien dans lequel se trouve la zone d'étude et de recevoir les approbations nécessaires si elle se trouve dans une zone aérienne contrôlée. La météo, le vent et la possibilité d'orage, ainsi que l'état du véhicule aérien doivent également être pris en compte lors de la planification du vol. La mise en place d'échelles et de points de références ayant des coordonnées géographiques connues pourrait également être nécessaire.

3) Règlements de vol

Au Canada, l'utilisation de véhicules aériens sans pilote est réglementée par Transports Canada. Les véhicules doivent être enregistrés et les opérateurs doivent posséder la certification appropriée pour le type d'espace aérien dans lequel se retrouve le site à l'étude. Il est important de minimiser les dangers potentiels liés à l'utilisation de véhicules aériens sans pilotes.

4) Maximiser le degré de précision des cartes

La plupart des véhicules aériens sans pilotes sont équipés d'outils sophistiqués visant à faciliter le vol et diminuer les risques d'écrasement. On retrouve parmi ceux-ci un système mondial de navigation par satellite (GNSS), un altimètre barométrique, un compas, des capteurs d'évitement des collisions, et d'un cardan (afin de réduire les distorsions d'images dues au mouvement). Les véhicules aériens sans pilotes sont contrôlés à l'aide d'un système radio bidirectionnel connectant l'appareil à la manette de contrôle au sol. Cette dernière est habituellement liée à une tablette électronique ou un téléphone cellulaire afin de fournir des télémesures et un accès au visuel de la caméra du véhicule. La plupart des véhicules aériens sont équipés de GNSS ayant une précision de ± 2 à 5 m et d'un altimètre barométrique pouvant être affecté par les changements d'altitude et de pression atmosphérique. De ce fait, un degré d'imprécision est induit dans les résultats. Des vols répétés démontrent que les points géoréférencés (X Y) sont habituellement précis à environ 1,5 m, alors que les modèles d'altimétriques montrent encore plus de variation entre les mesures prises durant chaque vol au-dessus de la même zone. Ceci illustre les limites des véhicules aériens sans pilote destinés aux consommateurs. Ce niveau de précision peut toutefois être suffisant dans certains cas. Toutefois, s'il est planifié d'intégrer les résultats à d'autres données géoréférencées, ces imprécisions peuvent se montrer problématiques. Il est possible de rectifier ces problèmes de deux manières : 1) utiliser un véhicule aérien sans pilote destiné aux professionnels, équipé d'un récepteur GNSS de meilleure qualité; ou 2) établir des points de références ayant des coordonnées géographiques connues avant le début du vol. Ces points de référence peuvent ensuite être utilisés afin de raffiner les résultats de l'analyse photogrammétrique. Dans certains cas, il peut être possible d'obtenir des résultats précis à quelques centimètres près. Il est important de posséder des données très précises afin d'être capable de les intégrer à d'autres jeu de données dans un logiciel de SIG.

5) Photogrammétrie et analyse des données à l'aide des SIG

L'utilisation d'un véhicule aérien sans pilote à des buts de cartographie peut mener à la création de plusieurs centaines d'images se chevauchant. Elles peuvent ensuite être analysées et interprétées de manière plus détaillée avec un logiciel de photogrammétrie. Ce type de logiciel identifie les points communs entre les photos et utilise ces derniers afin réorienter et amalgamer ensemble les photos. Ceci résulte en une image aérienne à grande échelle géoréférencée dans un espace cartésien. Les modèles altimétriques numériques dérivent des mesures d'altitude des différents points communs partagés par des photos prises à partir de différents points de vue. Ces points forment un dense nuage de coordonnées XYZ qui sont ensuite interpolées afin

de produire un modèle altimétrique numérique.

Puisque ces cartes sont géoréférencées, elles peuvent être téléchargées dans un logiciel de SIG afin d'effectuer des analyses spatiales plus détaillées. Elles peuvent être transformées selon différents systèmes de grilles cartésiennes, intégrées à d'autres données cartographiques géoréférencées (les résultats d'un levé géoradar, par exemple) et être le sujet de plusieurs autres analyses. Par exemple, un modèle altimétrique numérique peut être colorisé afin de produire une représentation visuelle du relief, ou soumis à des fonctions de délimitation/tracé. De telles méthodes de traitement et d'analyse numériques des données sont des moyens efficaces et relativement rapides de produire des interprétations.

6) Exemples de l'utilisation d'un véhicule aérien sans pilote

Deux vols effectués à l'aide de véhicules aériens sans pilote sont utilisés ici comme exemples afin d'illustrer l'utilité de la photographie aérienne conventionnelle. Le premier consiste en un vol effectué en 2016 au-dessus du cimetière associé au pensionnat Cecilia Jeffrey, dans la région de Kenora (Ontario). Ce vol a servi à tester de manière informelle la cartographie aérienne dans un contexte de cimetière associée aux pensionnats indiens. Le second est un vol réalisé en 2021 au-dessus d'un cimetière datant de la fin XIX^e et du début XX^e siècle de la Première Nation Bingwi Neyaashi Anishinaabek (BNA), située près du lac Nipigon (Ontario). La Première Nation BNA a autorisé l'utilisation des résultats de cette étude dans ce document.

Le pensionnat Cecilia Jeffrey a d'abord ouvert ses portes à Shoal Lake (Ontario) en 1902 et y est resté jusqu'en 1929, année à partir de laquelle il a été déménagé à Round Lake, près de Kenora, pour y rester jusqu'en 1974. Des sépultures ont été notées à trois endroits différents près de Round Lake (figure 2). Les sépultures associées au premier emplacement du pensionnat ont été exhumées en 1952 afin de permettre la construction d'une route et ont été réinhumés dans un nouveau cimetière situé au sud de Round Lake. Le plus ancien des deux cimetières au sud de Round Lake est situé dans une bande étroite de terre boisées. Le plus récent d'entre eux est délimité par une clôture envahie par les hautes herbes (figure 2). Bien que le sol soit recouvert par la végétation, l'utilisation d'un véhicule aérien sans pilote permet de générer des cartes de meilleure résolution que celles des images satellites conventionnelles, permettant ainsi une meilleure détection et interprétation des conditions de surface. En étudiant les détails de l'image obtenue, il est par exemple possible de distinguer des croix de bois peintes en blanc parmi les hautes herbes dans le cimetière le plus récent. L'élimination prudente de cette végétation pourrait permettre la mise au jour de d'autres détails associés à ce cimetière.

Le plus ancien cimetière de la Première Nation BNA date probablement de la fin du XIX^e siècle, avant l'expulsion de la communauté des terres sur lesquelles se trouvaient leur réserve en vue de la création d'un parc provincial dans les années 1950. La communauté a demandé que l'endroit soit cartographié au printemps 2021 et a autorisé l'utilisation des résultats obtenus dans le document présent. Depuis la récupération récente des terres de leur réserve, les cimetières historiques ont été soigneusement

entretenus. Bien que la plupart des croix en bois aient disparu depuis longtemps, des irrégularités à la surface suggèrent la présence d'anciennes sépultures (figure 3). Leur présence probable est visible dans la présence ou l'absence de végétation à certains endroits sur le site, ainsi que lorsque le modèle altimétrique numérique est agrémenté de couleurs et de lignes de délimitation espacées à 2,5 cm.

La cartographie réalisée à l'aide de véhicules aériens sans pilote peut mener à la création de cartes photographiques et topographiques de haute résolution. Si celles-ci sont géoréférencées de manière appropriée, elles peuvent ensuite être utilisées comme cartes de base sur lesquelles les résultats géoréférencés de d'autres méthodes (comme le radar pénétrant) peuvent être superposés. Ceci permet ainsi de comparer de manière plus efficace les résultats obtenus par chaque méthode et de constater sur quels points ils s'accordent ou se contredisent. L'utilisation de plusieurs méthodes permet de consolider et de raffiner les interprétations produites et d'informer les prochaines étapes de la recherche.

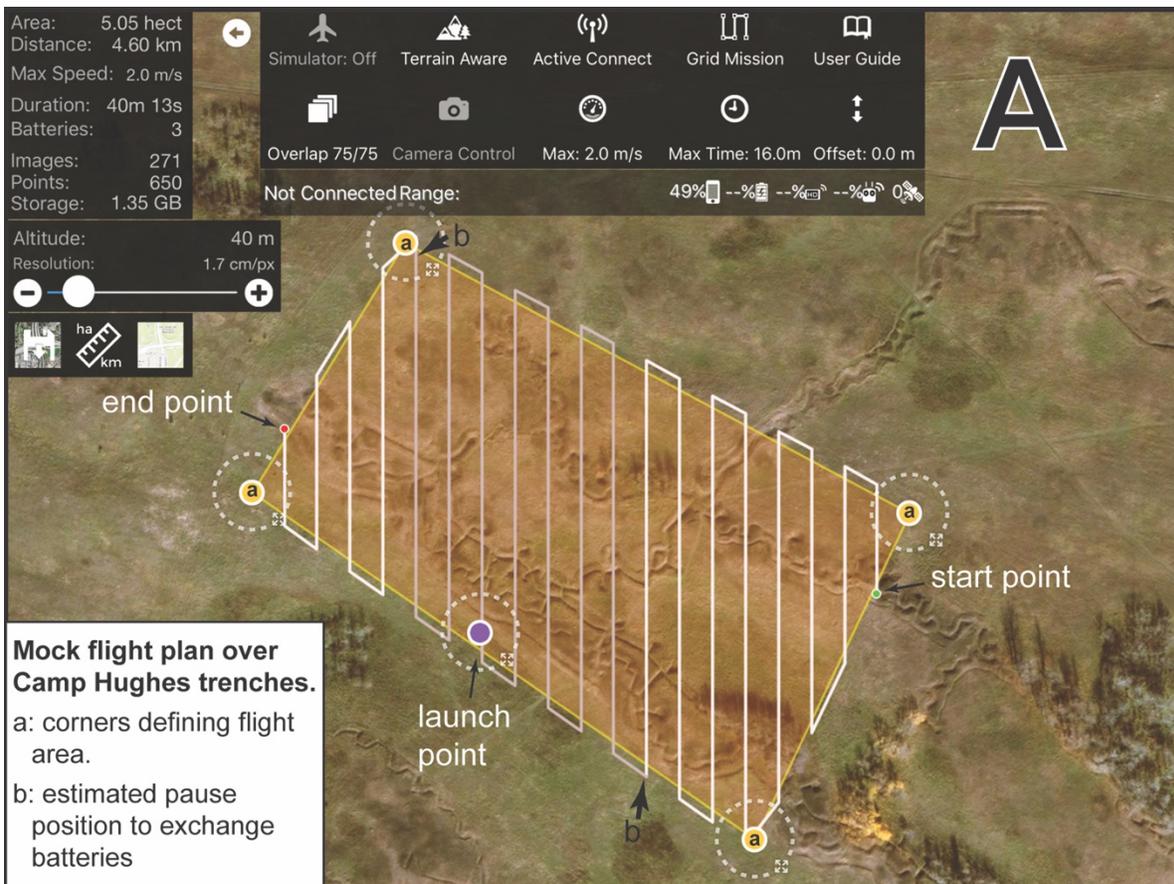


Figure 1. Simulation d'un plan de vol semi-autonome de véhicule aérien sans pilote au-dessus d'anciennes tranchées d'entraînement militaire au Camp Hugues (Manitoba). Les paramètres de vol sont sélectionnés pendant l'étape de planification et sont enregistrés pour le vol à venir. Une fois lancé, le véhicule aérien suivra ces lignes de vol à l'altitude et à la vitesse spécifiée tout en prenant automatiquement des photos afin d'obtenir le degré de chevauchement entre les images souhaité.

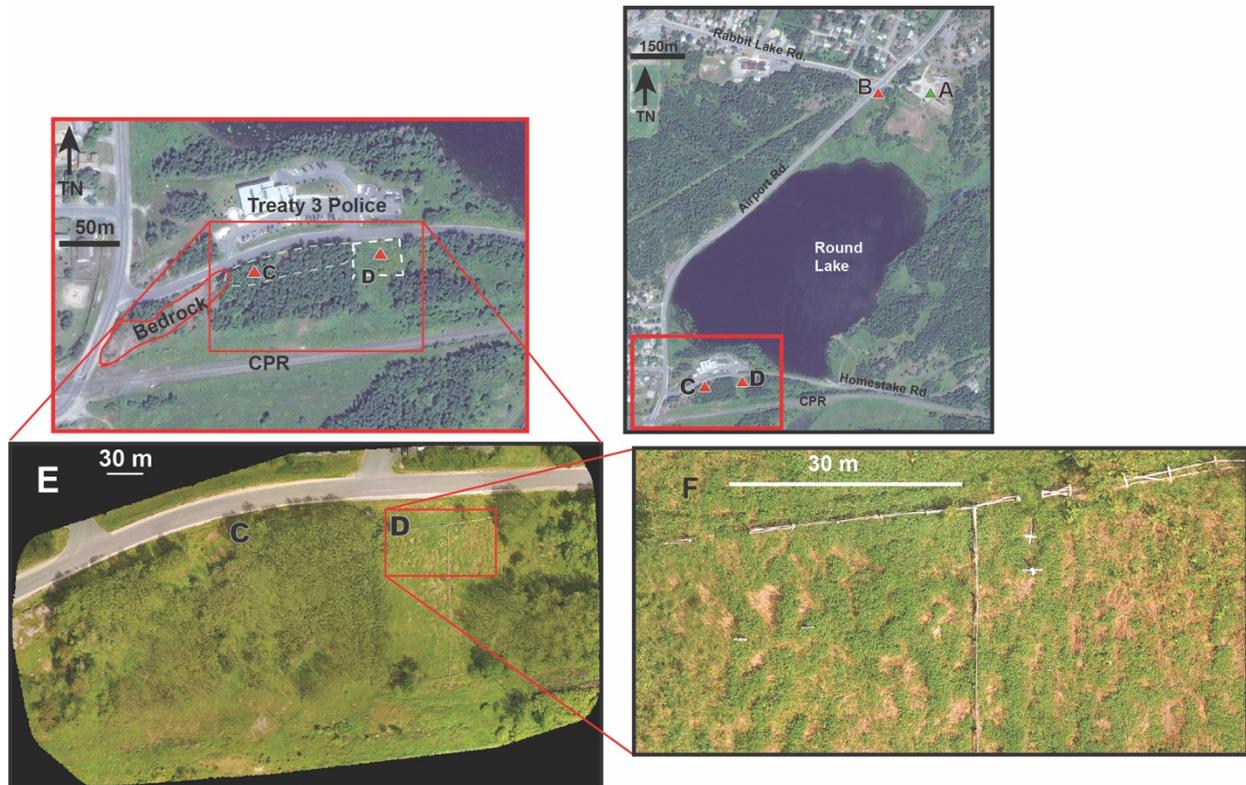


Figure 2. Documentation aérienne des cimetières connus associés au pensionnat indien Cecilia Jeffrey à Kenora (Ontario). Les deux images supérieures sont des images satellites provenant de Google Earth et qui possèdent une résolution assez basse, les rendant plus floues au fur et à mesure où elles sont agrandies. Les deux images inférieures ont été obtenues à l'aide d'un véhicule aérien sans pilote volant à 40 m d'altitude. Bien que les détails au sol soient masqués par la végétation, leur plus haute résolution permet de les agrandir et de détecter des structures d'intérêt au sol.

- A** Emplacement approximatif du pensionnat indien Cecilia Jeffrey
- B** Localisation des six sépultures exhumées autour de 1952
- C** Vieux cimetière
- D** Nouveau cimetière

Les deux cimetières associés au pensionnat indien Cecilia Jeffrey les plus récents sont situés dans la partie sud de Round Lake. Le plus vieux des deux est retrouvé dans un terrain boisé, dans la partie ouest de l'orthophotographie (E). L'agrandissement F montre une portion du nouveau cimetière, délimité par une clôture et où quelques croix sont visibles dans les herbes hautes.

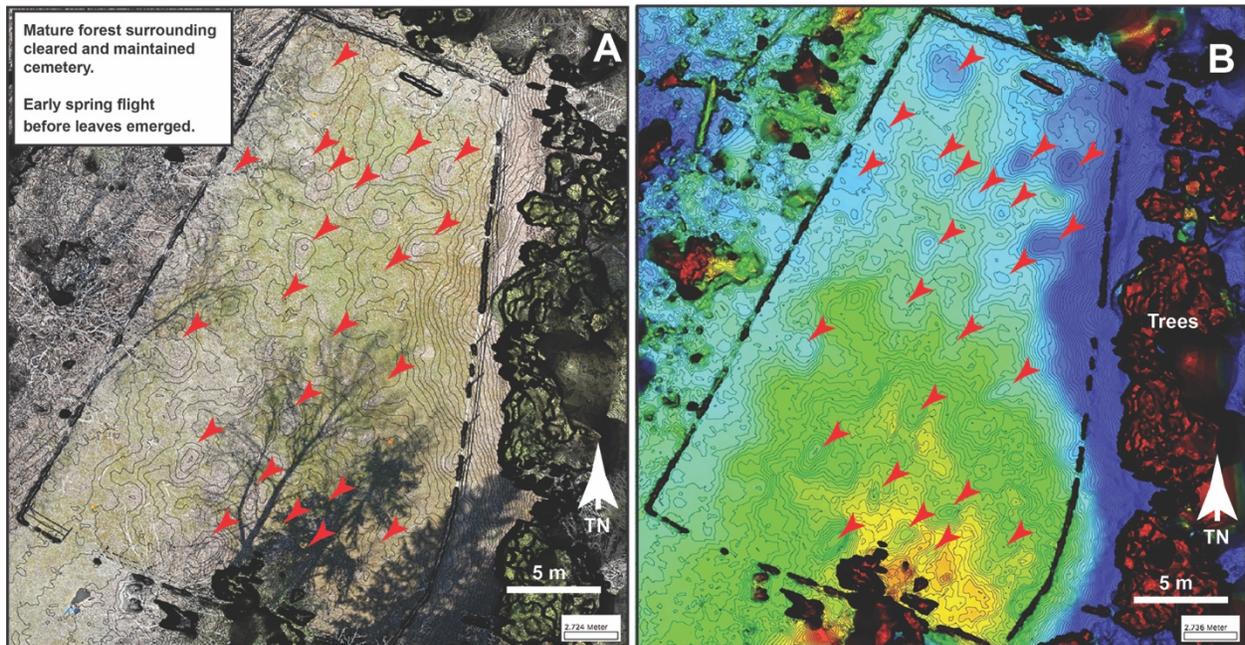


Figure 3. Images photogrammétriques obtenues avec un véhicule aérien sans pilote montrant le cimetière historique de la Première Nation Bingwi Neyaashi Anishinaabek (Première Nation Sand Point) au lac Nipigon (Ontario) (avec la permission de la Première Nation BNA). Le cimetière a été abandonné pendant plus de 50 ans lorsque la communauté fut expulsée lors de la création d'un parc provincial. L'endroit est maintenant entretenu de manière régulière, ce qui rend visible les dépressions associées aux sépultures même si les croix de bois qui les marquaient sont maintenant décomposées. L'image A est une orthophotographie à laquelle des lignes de délimitation ont été ajoutées à l'aide d'un logiciel de SIG. L'image B est le modèle altimétrique à laquelle une colorisation de type « carte thermique » a été appliquée afin de mettre en valeur le changement dans le relief du terrain du cimetière. Le bleu montre des zones plus basses alors que le jaune/orange indique des zones plus élevées. Les extrêmes sont colorés de rouge (haut) ou de bleu (bas). Un logiciel de SIG a été utilisé afin de générer des lignes de délimitation visant à mettre en valeur les variations du niveau du sol qui indiquent la présence de sépultures dont les marqueurs ont disparu depuis longtemps.

Auteurs:

Scott Hamilton avec la contribution du Groupe de travail sur les sépultures non-marquées de l'ACA.

Remerciements:

Nous remercions Jill Taylor-Hollings, Liam Wadsworth, Lisa Hodgetts, Lisa Rankin, Kisha Supernant, Peter Dawson, et Rick Duchscher pour leurs commentaires pertinents sur une version précédente de ce document.