



Canadian Archaeological Association
Association canadienne d'archéologie

La magnétométrie

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

Introduction

Bien que le radar pénétrant (ou géoradar) soit parmi les méthodes de télédétection les plus communes et fiables pouvant servir à la recherche de sépultures non-marquées, les communautés doivent savoir que plusieurs autres options existent. Ceci est important puisqu'il arrive que le radar pénétrant ne soit pas efficace, par exemple dans des zones où les sols empêchent la pénétration du signal radar ou qui comportent une végétation dense ne permettant pas à l'antenne d'être en contact avec le sol. On doit avoir recours à d'autres méthodes dans ces situations. Il est également recommandé de faire appel à plusieurs méthodes de télédétection même lorsque le radar pénétrant peut être utilisé. En effet, l'utilisation de chacune d'entre elle va mener à la création de jeux de données distincts fournissant des renseignements uniques sur les éléments d'intérêt et pouvant aider à confirmer la présence de sépultures, contribuant ainsi à l'augmentation du niveau de confiance de l'interprétation. Ce document fournit un bref aperçu du processus de réalisation d'un levé magnétométrique, l'une des méthodes de télédétection les plus utilisées en archéologie. Ce document cherche à fournir assez d'information aux communautés pour qu'elles soient capables de travailler avec des spécialistes de la télédétection afin d'obtenir les résultats qu'elles souhaitent avoir et dont elles ont besoin.

La magnétométrie fait partie des techniques géophysiques magnétiques qui mesurent les différences dans le champ magnétique de la Terre et/ou les différences dans les propriétés magnétiques du sol. Ces différences peuvent être dues à plusieurs choses, par exemple des événements de perturbation des sols (tels que le creusement et le remplissage de sépultures). La couche superficielle du sol (la couche de terre la plus proche de la surface) possède généralement des propriétés magnétiques plus élevées que les couches inférieures puisqu'elle contient une plus grande variété et quantité de fer. Quand une sépulture est creusée puis remplie, les différentes couches de terre sont mélangées, faisant en sorte que la signature magnétique de la sépulture est différente de celle de la terre qui l'entoure. Ces différences sont très subtiles et leur détection nécessite l'utilisation d'outils spécialisés (figure 1). Les détecteurs de métal ne

conviennent pas aux levés magnétométriques, étant donné qu'ils ne sont pas suffisamment sensibles et ne peuvent détecter des objets enfouis qu'à un maximum de 30 cm.



Figure 1. Levé magnétométrique de trois sépultures européennes non-marquées à Mercy Bay, TNO. L'instrument utilisé est un gradiomètre par flux Geoscan FM256.

L'identification de sépultures à l'aide d'un magnétomètre, comme avec l'utilisation de n'importe quelle autre méthode de télédétection, est un processus complexe. La réussite d'un levé magnétométrique va dépendre d'une variété de facteurs. Le plus important d'entre eux est le degré de différence entre le remblai utilisé lors de l'inhumation et la terre qui entoure la sépulture. Cette différence est généralement très petite, rendant l'identification de la sépulture impossible et l'utilisation d'une autre méthode nécessaire. La présence de morceaux de fer dans la sépulture, tels que des clous ou de la quincaillerie de cercueil, pourrait être détectable dans des sépultures peu profondes, mais il est généralement impossible de les distinguer des autres morceaux de métal qui se retrouvent souvent enterrés un peu partout sur les sites. La plupart du temps, la magnétométrie est donc utilisée comme supplément au radar pénétrant afin d'augmenter le niveau de confiance des résultats.

Puisque les levés magnétométriques sont l'un des types de levés géophysiques les plus rapides à réaliser, permettant d'examiner une grande superficie rapidement, la magnétométrie est souvent utilisée afin de localiser des bâtiments ou d'autres éléments identifiés par les survivants ou les documents d'archives qui ne sont plus visibles. La localisation de ces éléments dans le paysage est très utile afin de guider les levés de radar pénétrant, leur permettant de cibler les zones à fort potentiel.

Comme la plupart des techniques géophysiques, les levés magnétométriques ne perturbent pas les sols. La majorité des magnétomètres sont transportés au-dessus du sol et sont passifs, ce qui veut dire qu'ils ne font que mesurer les changements dans le

champ magnétique de la Terre plutôt qu'émettre de l'énergie dans le sol afin d'en mesurer la réponse.

1) Planification

Tous les sols ou les sites ne sont pas appropriés pour des levés magnétométriques (par exemple, présence de roches ignées ou environnements urbains). Par ailleurs, les sites d'habitation qui datent des XIX^e ou XX^e siècles, tels que les pensionnats indiens, sont souvent couverts de débris ferreux (clous et autres petits objets de fer provenant de vieux bâtiments ou de dépôts de déchets) qui nuisent grandement aux levés magnétométriques. La zone cible doit être étudiée au préalable afin d'évaluer les possibilités de réussite d'un levé magnétométrique ainsi que de déterminer la méthode de levé à utiliser. Pour se faire, on peut consulter des données de forage historiques et déterminer s'il existait un/des puits sur le site. On peut aussi organiser un projet pilote à petite échelle qui permettra de déterminer si les conditions du site sont propices à l'utilisation du magnétomètre et à l'obtention de résultats positifs. Ces études préliminaires servent à économiser du temps et de l'argent et permettent aussi d'éviter les déceptions. Il est aussi possible d'être encore plus économe en temps et en argent si des zones comportant potentiellement des sépultures peuvent être identifiées à l'aide de témoignages de survivants et de recherches en archives ayant eu lieu avant le début du travail de terrain. Il est également possible que le terrain doive être préparé avant le début de la recherche afin d'en retirer tout type de végétation pouvant nuire au processus de levé magnétométrique. En effet, plusieurs magnétomètres doivent être tenus immobiles tout au long de la collecte de données le long de lignes de levés droites. Même les petits obstacles, tels que les buissons, peuvent nuire à la recherche et rendre le processus plus long et plus coûteux. Il est également important de noter que l'utilisation du magnétomètre n'est pas appropriée dans des zones situées près de clôtures en métal, de stationnements, de bâtiments et d'autres structures contenant du métal.

La cartographie de la zone étudiée ainsi que la gestion des données spatiales résultant de levés sont des éléments importants de tout projet de télédétection. Les zones étudiées, les zones à haut potentiel, les obstacles ainsi que les autres éléments du paysage doivent être identifiés sur le site, cartographiés et ajoutés à un système d'information géographique (voir le document sur les SIG dans cette série). Plusieurs outils de cartographie existent, dépendant de la localisation de la zone étudiée. Ces outils incluent notamment les GNSS/GPS de haute précision, stations totales, GPS manuels, ou même des chaînes d'arpentage et compas. Les travailleurs devraient avoir recours aux outils qui fournissent les informations les plus précises possibles. Les GNSS/GPS et les stations totales sont les outils les plus précis et ont également l'avantage d'être utilisés avec des logiciels de cartographie, permettant l'enregistrement et la description automatique des points de levé. L'utilisation de chaînes d'arpentage et de compas est plus lente, requiert une prise de notes détaillées et peut entraîner des problèmes de répétabilité si les mesures sont réalisées par un personnel inexpérimenté. Par contre, cette méthode peut parfois être la seule option disponible dans des situations où les arbres bloquent les signaux GPS et la végétation dense nuit à l'utilisation d'une station totale. Peu importe la méthode utilisée, il est important que le levé soit précis au point de permettre aux membres de la communauté de localiser par eux-mêmes la position des

sépultures identifiées ou autres éléments d'intérêt après la fin de la recherche. Vous pourriez par exemple identifier les coins des grilles de levé à l'aide de petits piquets de plastique (et non de métal) afin de faciliter la localisation des éléments qui y ont été détectés dans le futur.

Bien que la magnétométrie soit l'une des méthodes de télédétection terrestre les plus rapides, cela reste un long processus. Le nombre de personnes nécessaires à la réalisation d'un levé de ce genre varie en fonction des instruments utilisés et les conditions du site, incluant le type de végétation et la présence d'autres obstacles. Certains instruments enregistrent les données plus rapidement, alors que ceux qui possèdent plusieurs capteurs réalisent le même travail en deux ou quatre fois moins de temps. La gradiométrie par flux est habituellement la méthode préférée par les archéologues puisqu'elle permet une collecte de données rapide et à haute densité. Plusieurs modèles commerciaux sont disponibles et permettent la configuration de plusieurs senseurs. En général, les levés magnétométriques peuvent être effectués de manière efficace par trois personnes, bien que certains instruments puissent en nécessiter moins. Nous estimons qu'une équipe de trois techniciens peuvent réaliser le levé d'un espace de 3000 à 6000 m² en une journée, dépendant des conditions et du type d'instrument utilisé. Ce type d'étude nécessite qu'un certain nombre d'éléments soient clarifiés au préalable, incluant l'obtention des permissions nécessaire, un accès au site, ainsi que des accords au sujet des horaires, des produits livrables, de l'échéancier du projet, de formations et du budget, si nécessaire. Les communautés requièrent également que certains protocoles soient respectés (cérémonies, échéanciers variables, règles de comportement).

Une variété de magnétomètres sont disponibles sur le marché, mais la plupart sont destinés aux secteurs de l'environnement et de l'ingénierie plutôt qu'à l'archéologie. Il est donc important de s'assurer que sélectionner un instrument qui soit adapté à la recherche de sépultures. Les éléments les plus importants à prendre en compte sont la sensibilité et la vitesse de l'instrument. La recherche de sépulture nécessite l'utilisation d'instruments capables de collecter des données de manière rapide et à une haute densité d'au moins 0,1 nT. Les magnétomètres les plus couramment utilisés en archéologie sont les gradiomètres à flux et les magnétomètres à vapeur alcaline (plus communs en Europe). D'autres instruments peuvent être appropriés mais sont souvent plus lents et plus difficiles à manœuvrer. Les options dépendront de la variété d'instruments disponibles localement, mais l'instrument sélectionné devrait tout de même respecter les spécifications cibles énoncées plus haut.

2) Protocoles de collection des données

La méthodologie employée pour la collecte de données va varier en fonction des buts du levé. Les archéologues font souvent la distinction entre deux types de levés : les *levés de reconnaissance* et les *levés de cartographie*. Un levé de reconnaissance consiste en l'étude à basse résolution d'une grande zone afin d'identifier l'emplacement approximatif d'une zone d'intérêt (par exemple un cimetière). Les levés de cartographie servent plutôt à sonder à plus haute résolution des aires aux dimensions plus restreintes afin de

cartographier la distribution et le nombre d'éléments (par exemple des sépultures) présents dans ces zones. Les levés de reconnaissance précèdent souvent les levés de cartographie et peuvent servir à économiser du temps et de l'argent en identifiant rapidement des zones cibles à l'intérieur de grands espaces qui peuvent ensuite faire l'objet d'analyses plus détaillées à plus haute résolution. Il faut toutefois savoir que puisque les levés de reconnaissance se font à plus basse résolution, des petites structures éphémères telles que des sépultures difficiles à identifier peuvent leur échapper. Étant donné la rapidité des levés magnétométriques (en comparaison aux autres méthodes de télédétection), les communautés pourraient vouloir sauter l'étape du levé de reconnaissance et plutôt faire un levé de cartographie à plus haute résolution sur l'ensemble du site. Cette décision doit toutefois être prise après avoir constaté que l'utilisation de cette méthode sur le site en question est possible.

Bien que plusieurs magnétomètres puissent être configurés de manière à permettre l'enregistrement des données avec un GPS intégré, la plupart d'entre eux ne fournissent pas le degré de précision nécessaire à la détection de sépultures. Il est aussi difficile de suivre l'évolution du levé avec un GPS, ce qui peut mener à de l'inconsistance au niveau de la densité de la collecte de données et même à l'oubli de certains endroits. L'ACA recommande donc que tous les levés magnétométriques soient menés à l'aide de grilles. Les tailles de grilles les plus courantes pour les levés magnétométriques sont de 10 m², 20 m², ou 30 m². Il peut être utile de conduire les levés à l'aide de grilles rectangulaires afin d'éviter de confondre l'orientation des données au cours de leur traitement. Toutefois, certains instruments ne permettent pas l'utilisation de grilles rectangulaires et les erreurs d'orientation peuvent être évitées à l'aide de notes de terrain précises. Les grilles de levé devraient être établies en utilisant une station totale ou un GNSS/GPS précis à 5 cm. Si l'aire étudiée est petite (par exemple 20 m x 40 m), il est suffisant d'établir la grille de levé à l'aide de rubans.

Contrairement au géoradar, il est préférable de sonder les éléments d'intérêt à environ 30 degrés par rapport à leur orientation (si elle est connue), puisque certaines fonctions de traitement de données peuvent supprimer les réponses des caractéristiques enfouies (particulièrement celles qui sont linéaires) lorsqu'elles sont croisées en ligne avec leur orientation. Cependant, l'orientation des éléments est souvent inconnue avant le début du levé, et les grilles sont plus souvent orientées en fonction des obstacles présents sur le terrain ou de l'orientation du terrain lui-même. Comme il est probable qu'un levé magnétométrique soit réalisé en même temps qu'un levé géoradar, il peut être plus efficace d'utiliser la même grille de collecte des données pour les deux. Cette grille sera probablement orientée de manière à être perpendiculaire (90 degrés) à l'orientation des sépultures (si elle est connue). Les coordonnées des coins de la grille de levé devraient être enregistrés avec un GNSS/GPS afin que les informations collectées dans la grille puissent être localisées aisément sur le terrain.

Un levé magnétométrique est réalisé en transportant, poussant ou traînant un magnétomètre en faisant des allers-retours le long de rubans et cordes disposés sur le sol à l'intérieur de la grille de levé. Les rubans et cordes servent à guider l'opérateur du magnétomètre et à assurer que l'ensemble de la surface de la grille soit couvert par le levé.

Les critères suivants sont recommandés:

Levé de reconnaissance

- Les grilles de levé devraient être disposées à l'aide d'une station totale ou d'un GNSS/GPS.
- Les coordonnées des coins de la grille de levé devraient être enregistrées avec un GNSS/GPS avec une précision de 5 cm.
- Une densité de collecte de points minimale de 0,5 m x 0,25 m est recommandée (par exemple, des données sont collectées à chaque 0,25 m le long de lignes espacées de 0,5 m entre elles).
- Les données sont collectées en zig-zag (collecte bidirectionnelle) ou en parallèle (collecte unidirectionnelle) le long de lignes disposées à l'intérieur de la grille, plutôt qu'en se guidant avec un GPS.

Levé de cartographie

- Les grilles de levé devraient être disposées à l'aide d'une station totale ou d'un GNSS/GPS.
- Les données sont collectées de manière unidirectionnelle en suivant des lignes parallèles afin de réduire les erreurs potentielles.
- Espacement minimal de 25 cm entre les lignes de collecte de données avec une densité de collecte de 12,5 cm ou moins (par exemple 6,25 cm).

3) Traitement, interprétation et présentation des données

Une fois le levé terminé, les données collectées doivent être traitées à l'aide d'un logiciel informatique afin de générer des graphiques nécessaires à l'interprétation et à la présentation des données. Les graphiques en question ressemblent beaucoup à des photos aériennes (figure 2). Le traitement de données magnétométriques peut nécessiter plusieurs étapes puisque le champ magnétique terrestre est en changement constant. Cela cause plusieurs effets naturels qui doivent être filtrés afin d'être capable d'interpréter les données correctement. Des inconsistances dans les données sont aussi courantes dû à la grande sensibilité des instruments utilisés. Il est important que chaque étape du traitement des données soient réalisées dans l'ordre correct puisque chaque filtre va avoir un effet sur les étapes suivantes.

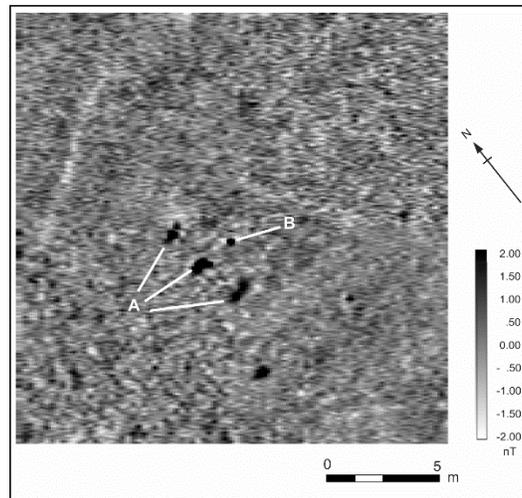


Figure 2. Exemple de résultats obtenus avec un gradiomètre, montrant la localisation de trois sépultures non-marquées de marins européens du XIX^e siècle (A) à Mercy Bay, TNO. Le graphique montre aussi la présence de la base possible d'une ancienne pierre tombale (B) associée à ces sépultures.

Le traitement des données devrait se faire selon les étapes recommandées par le fabricant de l'instrument utilisé et le logiciel utilisé. Celles-ci peuvent inclure, entre autres: 1) une revue des données brutes, 2) éditer les données afin d'éliminer les pics de « bruit » qui affectent les calculs statistiques dans les étapes de traitement des données subséquentes, 3) neutraliser les réponses majeures (par exemple, des clôtures), éliminer les défauts de collection des données sur le terrain (tels que l'orientation et la constance de l'opérateur) ainsi que les pics dus aux objets métalliques retrouvés près de la surface (il est toutefois nécessaire d'être prudent car dans certains cas, les clous ou la quincaillerie de fer peuvent être les seuls indices de la présence d'une sépulture), finaliser l'amélioration des graphiques, notamment en lissant ou en interpolant les données (figure 3).

Les données issues d'un levé magnétométrique peuvent être difficiles à interpréter et il est important que cette tâche revienne à des individus ayant de l'expérience préalable dans le domaine. Par exemple, il est possible que la forme et la taille de la réponse magnétique d'un objet enterré soit complètement différente de sa forme réelle. Un petit objet de fer, tel qu'un clou, crée une réponse magnétique positive et négative, visible dans les données sous la forme d'une image blanche et noire et dont la forme varie en fonction de l'orientation de l'objet (figure 4). Toutefois, aucune d'entre elles ne ressemble à un clou. La taille de la réponse magnétique du clou va également être beaucoup plus grosse que le clou lui-même et peut mesurer jusqu'à un mètre sur le graphique. La présence de tuyaux souterrains ou de clôtures situées le long d'un terrain peut créer des réponses énormes dans les données, cachant toutes les réponses subtiles pouvant avoir été produites par des sépultures dans cette zone et rendant le levé inutile.

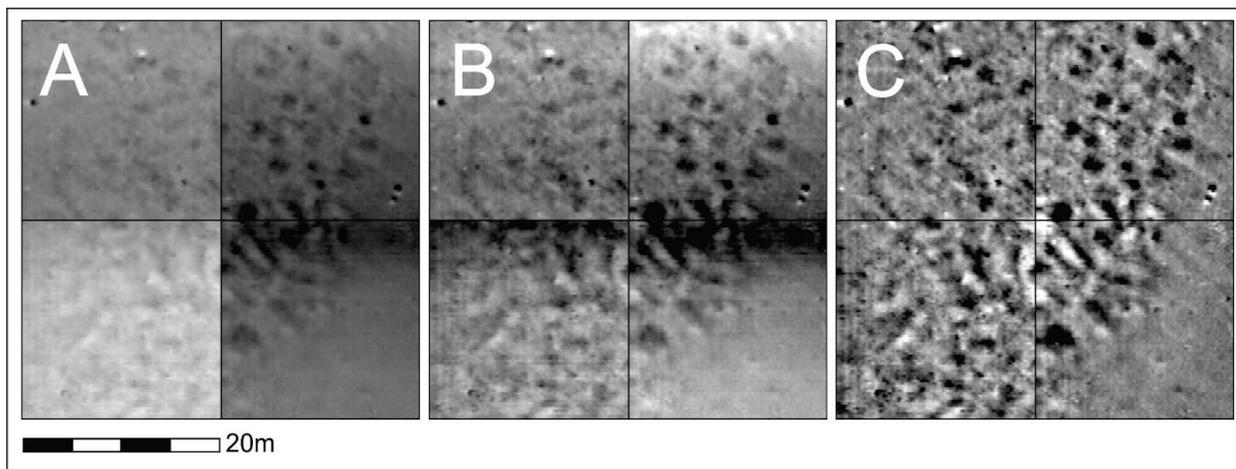


Figure 3. Exemple montrant les effets de certaines fonctions utilisées lors du traitement des données et l'amélioration des graphiques pour faciliter leur interprétation (notez que les termes utilisés peuvent varier d'un logiciel à un autre). A : données brutes montrant des réponses différentes dans chaque grille en raison des variations quotidiennes dans le champ magnétique naturel de la Terre. B : résultats après l'application de la fonction Zero Mean Grid afin d'uniformiser les résultats de chaque grille. C : résultats finaux après l'application de Zero Mean Traverse et de l'édition (*clipping*) des données afin d'éliminer l'effet de la pente et d'augmenter le contraste des éléments d'intérêt.

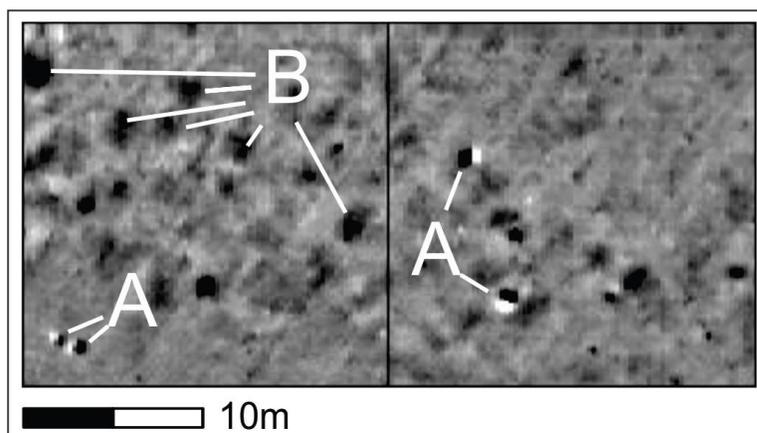


Figure 4. Exemple de résultats obtenus avec un gradiomètre montrant les réponses magnétiques de petits objets de fer enterrés. Remarquez que bien qu'ils mesurent probablement moins de 10 cm, ces petits objets sont représentés dans le graphique comme mesurant plus qu'un mètre et comme étant de taille comparable aux fosses archéologiques (B), qui étaient l'objet du levé.

L'interprétation des résultats d'analyses géophysiques nécessite inévitablement l'utilisation de niveaux de confiance. Par exemple, un archéologue pourrait assigner un niveau de confiance de 70% aux résultats indiquant la présence de sépultures à un endroit particulier, dépendant de la clarté des résultats obtenus. C'est à ce moment que d'autres sources d'information deviennent particulièrement pertinentes, telles que d'autres méthodes de télédétection ou des témoignages de survivants. Si toutes ces

sources d'information pointent dans la même direction, il peut être possible d'être plus confiant des résultats de l'analyse magnétométrique. Il est important que le levé fasse des distinctions claires entre les différents niveaux de confiances utilisés, comme entre les inférences basées sur les critères démontrables scientifiquement et les spéculations basées sur l'expérience.

4) Présentation des résultats

Le rapport final devrait inclure les éléments suivants:

- Des copies des données brutes à des fins d'archivage.
- Une brève description du site décrivant les types de sols présents et la géologie de l'endroit, les conditions au sol et la végétation, les bâtiments présents et les perturbations antérieures connues (telles que des fouilles archéologiques ou la présence de câbles ou tuyaux) qui pourraient avoir un impact sur les résultats du levé.
- Photographies (si approprié) de chaque aire de levé montrant les conditions au sol.
- La méthodologie de levé devrait fournir une description des instruments utilisés et de la séparation entre/direction de chaque ligne de collecte des données, de l'intervalle de collecte et la résolution spatiale obtenue.
- Une carte montrant l'emplacement des grilles de levé par rapport aux autres éléments du site.
- Toutes les cartes devraient être géoréférencées et le système de coordonnées géographiques et la projection utilisés devraient être identifiés afin que les grilles puissent être replacées sur le site facilement.
- Des graphiques montrant les données avant leur traitement devraient être inclus avant la présentation des graphiques montrant les données après l'application de filtres.
- Toutes les étapes de traitement des données devraient être décrites en détails. Cette description doit aussi expliquer les effets de ce traitement sur les données.
- Les anomalies qui résultent d'erreurs dans la collection des données qui ne peuvent être éliminées pendant leur traitement devraient être décrites et distinguées des autres réponses identifiées dans les données.
- L'interprétation proposée devrait faire la distinction entre les causes anthropogéniques et les autres causes du renforcement des signaux magnétiques.

- Des descriptions de la séparation entre les éléments magnétiques positifs et négatifs ainsi que des zones où l'activité enregistrée est statistiquement différente des autres devraient être fournies lorsqu'approprié.
- La profondeur approximative des éléments relevés devrait être calculée (par exemple, en utilisant le radius de la dimension de l'élément, ou *half-width rule*).
- Nous recommandons généralement l'utilisation de graphiques en tons de gris plutôt qu'en fausses couleurs puisque les tons de gris facilitent la détection de détails subtils. Les graphiques en fausses couleurs devraient seulement être utilisés dans des cas où ils pourraient faciliter la distinction du contour de certains éléments. Tous les graphiques devraient inclure une flèche indiquant le nord, une légende identifiant les unités et les valeurs appropriées ainsi qu'une échelle.
- Les plans utilisés afin de produire des interprétations montrant les éléments d'intérêt devraient être placés aux côtés des graphiques produits au cours de l'analyse.
- Les anomalies d'intérêt devraient être identifiées sur les graphiques à l'aide d'un identifiant unique et décrites en détails (forme, polarité, amplitude du signal). Ceci pourrait être réalisé sous la forme d'un tableau.

Auteur:

Edward Eastaugh au nom du Groupe de travail sur les sépultures non-marquées de l'ACA.

Remerciements:

Nous remercions Evan Ulmer P.Eng. ainsi que le Dr. Jonathan Fowler pour leurs commentaires pertinents sur une version précédente de ce document.