

**IDENTIFICATION D'ÉTANGS VERNAUX
À L'AIDE DU LIDAR ET DE LA PHOTO-
INTERPRÉTATION**

Présenté à :

M. Yohann Dubois, biologiste
Ministère du Développement durable, de
l'Environnement, de la Faune et des Parcs –
Direction générale de l'expertise
sur la faune et ses habitats

Par :



Centre d'enseignement et de recherche
en foresterie de Sainte-Foy inc.

Mathieu Varin, géomaticien, M.Sc.
Philippe Bournival, ing.f., M.Sc.
Isabelle Duclos, biologiste, M.Sc.
Jean Fink, biologiste

Mars 2014

Mots-clés : Étangs vernaux, Cartographie, Hydrologie, LiDAR, Photo-interprétation, ArcGIS, Summit Evolution

Référence à citer :

Varin, M., P. Bournival, I. Ducloux et J. Fink. 2014. Identification d'étangs vernaux à l'aide du LiDAR et de la photo-interprétation. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2014-02. 17 pages + 1 annexe.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	iv
INTRODUCTION.....	1
OBJECTIFS.....	2
1. Méthodes.....	3
1.1. Localisation du site d'étude.....	3
1.2. Préparation des données.....	4
1.3. Identification des dépressions à l'aide des données LiDAR.....	5
1.4. Identification des étangs vernaux par photo-interprétation.....	6
1.5. Comparaison des résultats issus des deux méthodes.....	6
2. Résultats.....	8
2.1. Cartographie des dépressions à l'aide des données LiDAR.....	8
2.2. Cartographie des étangs vernaux par photo-interprétation.....	9
2.3. Comparaison des résultats (indicateur d'évaluation).....	9
DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS.....	13
CONCLUSION.....	15
RÉFÉRENCES.....	16
ANNEXE 1. DÉPRESSIONS IDENTIFIÉES PAR LE LIDAR.....	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de la délimitation du site d'étude dans la région de l'Outaouais.....	4
Figure 2 : Carte des dépressions identifiées par les analyses LiDAR.....	8
Figure 3 : Carte des étangs vernaux identifiés par la photo-interprétation	9
Figure 4 : Carte synthèse des étangs vernaux photo-interprétés et des dépressions identifiées par les analyses LiDAR.....	11

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats obtenus pour l'identification des étangs vernaux par la photo- interprétation fine et pour les dépressions par les analyses LiDAR.....	12
Tableau 2 : Comparaison des deux méthodes (LiDAR et photo-interprétation) en termes de temps-personnes et estimation pour une plus grande superficie d'analyse.....	12

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), Québec. Les auteurs tiennent à remercier M. Yohann Dubois, biologiste au MDDEFP, pour avoir donné au CERFO l'opportunité de participer à ce projet expérimental de cartographie des étangs vernaux. Nous tenons aussi à remercier M. Luc Milks et M^{me} Anick Patry du MRN en Outaouais pour leur collaboration quant à l'acquisition des données LiDAR et des photos aériennes.

RÉSUMÉ

Les étangs vernaux sont des milieux humides particuliers en raison de leurs nombreuses fonctions écologiques et de leur importance capitale dans le cycle vital de nombreuses espèces, notamment les amphibiens et les reptiles. Ils ne sont généralement pas considérés dans la planification du territoire étant donné leur état éphémère, leur isolement du réseau hydrologique et leurs faibles superficies (< 0,1 ha). Conséquemment, il est difficile de les protéger, d'autant plus qu'une méthode semi-automatisée et éprouvée n'existe pas à l'heure actuelle pour les identifier et les cartographier. Enfin, la présence d'une couverture forestière accentue la plupart du temps la difficulté d'identification de ces nappes d'eau temporaires.

Plusieurs méthodes conventionnelles peuvent être utilisées pour cartographier les étangs vernaux, telle la photo-interprétation fine. Cette dernière est toutefois laborieuse et relativement onéreuse et nécessite des prises de photos en absence de feuillage. Les méthodes semi-automatisées faisant appel à de nouvelles technologies, comme le LiDAR, sont très intéressantes à développer à l'échelle du territoire. Le LiDAR permet en effet d'avoir une résolution fine au niveau du sol, ce qui améliore considérablement le résultat des analyses hydrologiques.

Le mandat du présent projet est d'explorer les possibilités d'utilisation de cette technologie numérique pour l'identification des étangs vernaux. En raison de contraintes budgétaires, un site d'étude de seulement 100 ha a été retenu dans la MRC de Pontiac en Outaouais. Les dépressions de terrain où l'eau peut s'accumuler ont donc été identifiées grâce aux analyses LiDAR et celles-ci ont été comparées aux étangs vernaux photo-interprétés sur le site d'étude. Les résultats obtenus démontrent que les analyses LiDAR identifient davantage d'étangs vernaux que par photo-interprétation : des 20 dépressions révélées par le LiDAR, seulement 6 ont été identifiées comme des étangs vernaux par la photo-interprétation. Par contre, tous les étangs vernaux photo-interprétés ont été associés à une dépression délimitée par les analyses LiDAR.

INTRODUCTION

Les étangs vernaux remplissent de nombreuses fonctions écologiques, notamment par leur capacité à supporter différents habitats pour les amphibiens et les reptiles (Calhoun et Klemens, 2002; Lathrop *et al.*, 2005). Divers synonymes existent pour qualifier les étangs vernaux tels « étangs temporaires », « mares temporaires » et « étangs saisonniers ». Ces milieux humides sont très instables à cause de leur hydro-période. Il devient alors important de bien les identifier pour assurer une protection adéquate permettant de conserver leurs fonctions écologiques (Wang *et al.*, 2008). Leur faible superficie (< 0,1 ha) contribue également à la difficulté de les identifier, et par conséquent, de les protéger adéquatement (Julian *et al.*, 2009; Bertacchi et Maisonneuve, 2011). Ce type de milieu humide isolé est caractérisé par une dépression du terrain où l'eau s'accumule de façon temporaire et saisonnière. En effet, l'eau provenant de la fonte des neiges et des précipitations au printemps permet de remplir ces cuvettes (Brooks et Hayashi, 2002).

Une des méthodes existantes pour cartographier les étangs vernaux est la photo-interprétation, mais il est difficile de détecter les petits milieux humides isolés (Julian *et al.*, 2009). Cette méthode est très longue et coûteuse, ce qui a amené plusieurs chercheurs à développer des méthodes semi-automatisées, comme celle de Lathrop *et al.* (2005) qui se base sur l'analyse de photographies orthorectifiées prises au printemps, où l'absence de feuilles facilite l'identification des étangs vernaux. D'autres utilisent les nouvelles technologies comme le LiDAR pour identifier les étangs vernaux potentiels ou les dépressions du terrain qui peuvent accumuler l'eau (Julian *et al.*, 2009).

OBJECTIFS

L'objectif général du projet était d'identifier des étangs vernaux potentiels à partir de données topographiques issues d'analyses LiDAR et d'en comparer les résultats avec ceux de la photo-interprétation fine. Plus précisément, il s'agissait d'identifier les dépressions sur le territoire où l'eau pouvait s'accumuler et former des cuvettes. De cet objectif principal découlent plusieurs objectifs spécifiques :

- Traiter les données du LiDAR pour obtenir un modèle numérique de terrain (MNT);
- Identifier les dépressions sur le territoire à l'aide du MNT;
- Évaluer la précision de l'identification des étangs vernaux potentiels (dépressions) par une comparaison avec une photo-interprétation fine;
- Comparer les ressources nécessaires en termes de temps-personnes pour les deux méthodes de cartographie.

1. MÉTHODES

1.1. LOCALISATION DU SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude se situe dans la MRC de Pontiac, dans la région administrative de l'Outaouais (figure 1). Ce site a été sélectionné en fonction de trois critères. D'abord, pour identifier les dépressions et construire les modèles numériques, il était indispensable d'avoir une couverture LiDAR. Ensuite, la comparaison de ces résultats devant s'appuyer sur une photo-interprétation fine couvrant le même secteur, la couverture d'orthophotos sans feuilles était donc essentielle au choix du site. Enfin, avant de nous transmettre les données géospatiales, le ministère des Ressources naturelles (MRN) avait pré-identifié un certain nombre d'étangs vernaux dans ce secteur, ce qui nous a permis de déterminer un site d'étude où la présence d'étangs vernaux était assurée. En raison de contraintes budgétaires et compte tenu de la nature exploratoire du projet, un site d'étude de 100 ha a été retenu.

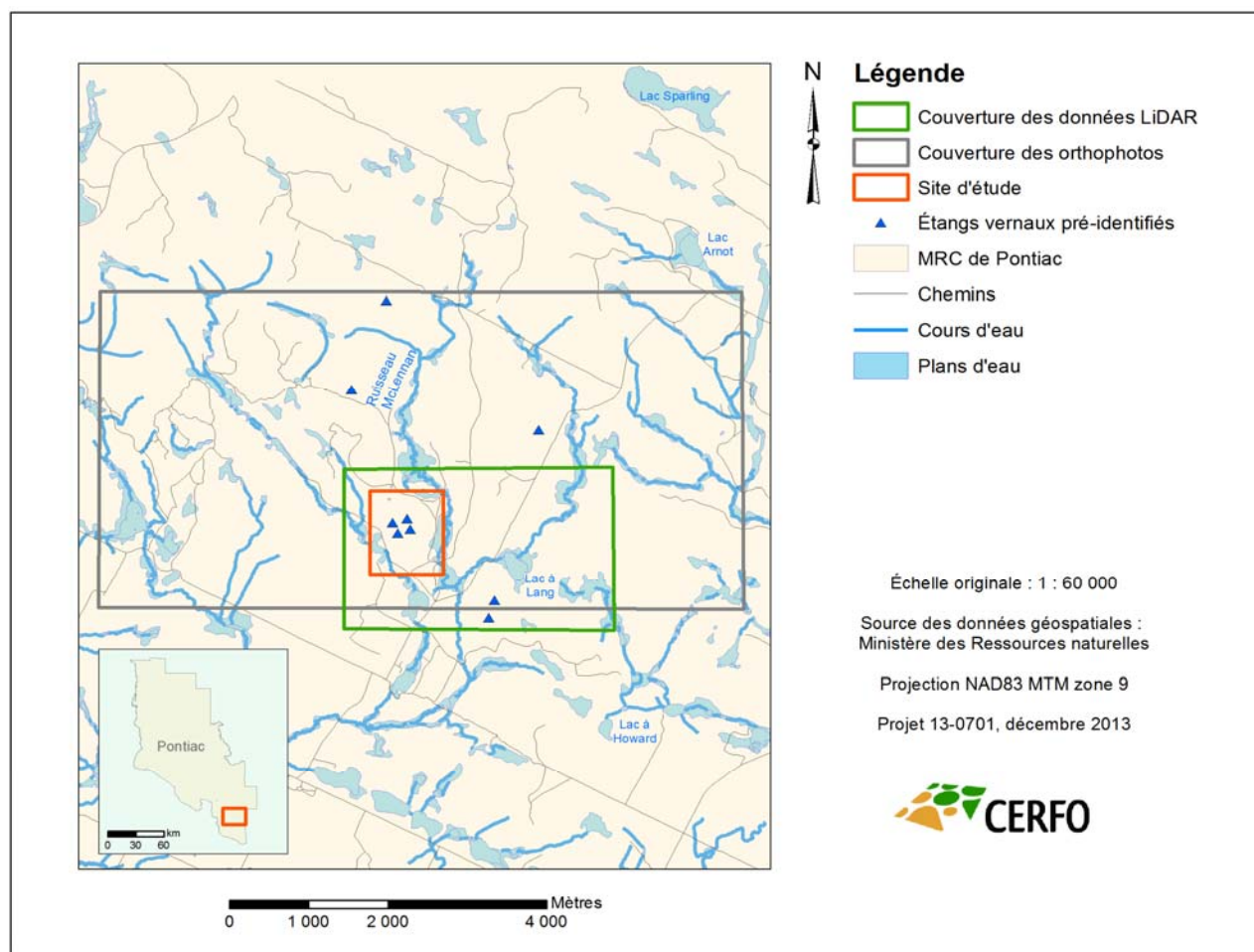


Figure 1 : Carte de la délimitation du site d'étude dans la région de l'Outaouais

1.2. PRÉPARATION DES DONNÉES

L'ensemble des données géospatiales a été projeté en NAD83 MTM zone 9. Les données qui ont été utilisées pour l'identification des dépressions ont été fournies par le MRN-Outaouais et concernent les données du LiDAR aéroporté (09_3065064F09) acquises en novembre 2009 et le réseau hydrologique. Les données du LiDAR ont été traitées afin de conserver les points touchant seulement le sol, ce qui a permis de faire une interpolation de ces points altimétriques pour obtenir un MNT. Au total, plus de 4,6 millions de points faiblement distancés (1,4 m) ont été analysés. Le réseau hydrologique a été bonifié par une zone tampon de 10 m afin de tenir compte de la connectivité hydrique entre le réseau hydrologique et les dépressions ou les étangs vernaux. Les données utilisées pour l'identification des étangs vernaux par photo-interprétation fine

proviennent des photographies orthorectifiées prises en mai 2011 (résolution : 30 cm) et du réseau hydrologique bonifié (zone tampon de 10 m) afin d'éliminer les étangs connectés à celui-ci.

1.3. IDENTIFICATION DES DÉPRESSIONS À L'AIDE DES DONNÉES LIDAR

Les données LiDAR ont été entièrement traitées à l'aide de l'outil d'analyse hydrologique d'ArcGIS (ESRI, 2013). Les données brutes, sous forme de points altimétriques, ont fait l'objet d'une interpolation afin d'obtenir l'altitude du sol (MNT) sur l'ensemble du territoire à l'étude. Une résolution relativement fine a été choisie (5 m) pour réduire le bruit des données interpolées. En effet, une résolution trop fine peut ne pas inclure assez de points pour l'interpolation, ce qui crée un bruit néfaste aux analyses hydrologiques. Comme les données LiDAR sur les plans d'eau étaient en partie manquantes, celles-ci ont été retirées du MNT à partir du réseau hydrologique afin d'éviter les anomalies situées près des plans d'eau. Les dépressions ont ensuite été calculées à l'aide du MNT avec l'outil d'analyse hydrologique d'ArcGIS. Les résultats obtenus ont été filtrés à l'aide de quatre critères de sélection afin de réduire le nombre élevé de dépressions identifiées.

Le premier critère de sélection concerne la superficie des dépressions. En effet, fixer une superficie minimale permet d'éliminer de petites dépressions moins intéressantes écologiquement. De plus, Bertacchi et Maisonneuve (2011) identifient les petits étangs de moins de 10 000 m² comme étant écologiquement importants. En fonction de la résolution du MNT, nous avons choisi de conserver les petites dépressions faisant entre 200 et 10 000 m². Le second critère de sélection a permis de raffiner le nombre de dépressions en retirant celles qui étaient connectées au réseau hydrologique. En effet, un étang vernal est isolé de toute source hydrique, sauf dans le cas d'un cours d'eau temporaire (Bertacchi et Maisonneuve, 2011). La distance par rapport au réseau hydrologique utilisée pour déterminer l'isolement a été de 10 m (Reif *et al.*, 2009). Le troisième critère de sélection a permis de conserver les dépressions où la différence d'altitude entre les points maximal et minimal était supérieure ou égale à 1 m. Malgré le fait que Lichvar *et al.* (2006) proposaient une différence d'altitude supérieure à 0,1 m, le choix d'utiliser une différence de 1 m a permis d'éliminer les dépressions de très petite taille représentant

potentiellement des anomalies issues du MNT. Par conséquent, les dépressions identifiées par ce critère étaient assez profondes pour servir de cuvette et d'une superficie minimale avoisinant les 200 m². Le dernier critère de sélection, directement lié au troisième, déterminait les dépressions qui avaient une capacité à accumuler une certaine quantité d'eau. Cette sélection s'est effectuée à l'aide des outils d'analyse hydrologique d'ArcGIS pour calculer l'accumulation et la direction des débits d'eau du territoire. Le paramètre de quantité d'eau a été fixé en fonction de l'accumulation de débit du plus petit étang vernal photo-interprété et représente donc la borne inférieure acceptable (520 m² d'aires de drainage).

1.4. IDENTIFICATION DES ÉTANGS VERNAUX PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

L'identification des étangs vernaux par photo-interprétation fine a été réalisée avec le logiciel Summit Evolution. Trois orthophotos (Q11002_052, Q11002_053 et Q11002-54 prises en mai 2011) ont été combinées afin de faire la numérisation 3D des étangs vernaux. Une grille divisant le territoire a été utilisée pour analyser chaque parcelle du site d'étude à une échelle fine (> 1 : 5 000), ce qui permet de voir les détails du terrain (Lathrop *et al.*, 2005). Certains éléments pouvant apporter de la confusion ont été particulièrement considérés lors de la photo-interprétation, notamment l'ombre et la présence d'arbres qui dominent et cachent une partie de l'étang (Calhoun et Klemens, 2002). De plus, une attention particulière a été portée à la délimitation des étangs vernaux isolés du réseau hydrologique et des autres milieux humides.

1.5. COMPARAISON DES RÉSULTATS ISSUS DES DEUX MÉTHODES

Les résultats issus des analyses LiDAR et de la photo-interprétation ont été comparés. Le nombre, la superficie et surtout la localisation ont été confrontés. De plus, un indicateur d'évaluation a été utilisé pour attribuer un ordre d'importance de concordance pour les diverses dépressions identifiées par les analyses LiDAR et les étangs vernaux photo-interprétés. Plus précisément, on a attribué une valeur de 0 lorsqu'il n'y avait pas de dépression localisée dans un étang vernal, une valeur de 1 lorsqu'une dépression était localisée dans un étang vernal mais dont la délimitation ne correspondait pas à la superficie inondée de l'étang (exacte et différente), et

une valeur de 2 lorsque la délimitation de la dépression localisée et de la surface inondée de l'étang vernal correspondaient ensemble de façon précise (exacte et précis). Quant à la valeur 1 (exacte et différente), il est important de souligner que l'imprécision entre la superficie de la dépression (Lidar) et la superficie inondée de l'étang (photo-interprétation) est en partie due aux conditions météorologiques de l'hiver et du printemps de l'année d'acquisition des données et par conséquent, cette imprécision varie en fonction de l'année et du mois d'enregistrement des données.

Les deux méthodes ont aussi été comparées en termes de temps-personnes. Plus précisément, les étapes pour effectuer les traitements pour les analyses LiDAR (production du MNT et identification des dépressions) et la photo-interprétation fine (interprétation et identification des étangs vernaux) ont été identifiées et évaluées. De plus, une estimation du temps requis de traitement pour une plus grande superficie a été effectuée.

2. RÉSULTATS

2.1. CARTOGRAPHIE DES DÉPRESSIONS À L'AIDE DES DONNÉES LIDAR

L'identification des dépressions s'est d'abord faite de façon semi-automatisée, ce qui a permis de faire ressortir toutes les dépressions du terrain, au nombre de 219. Ensuite, une sélection plus fine, décrite dans les méthodes, a permis de réduire ce nombre à 20 dépressions d'une taille moyenne de 1 025 m². Ces dépressions sont dispersées sur le territoire (figure 2) et se retrouvent dans des zones hétérogènes (bas de pente ou sur la colline) où la densité forestière est variable.

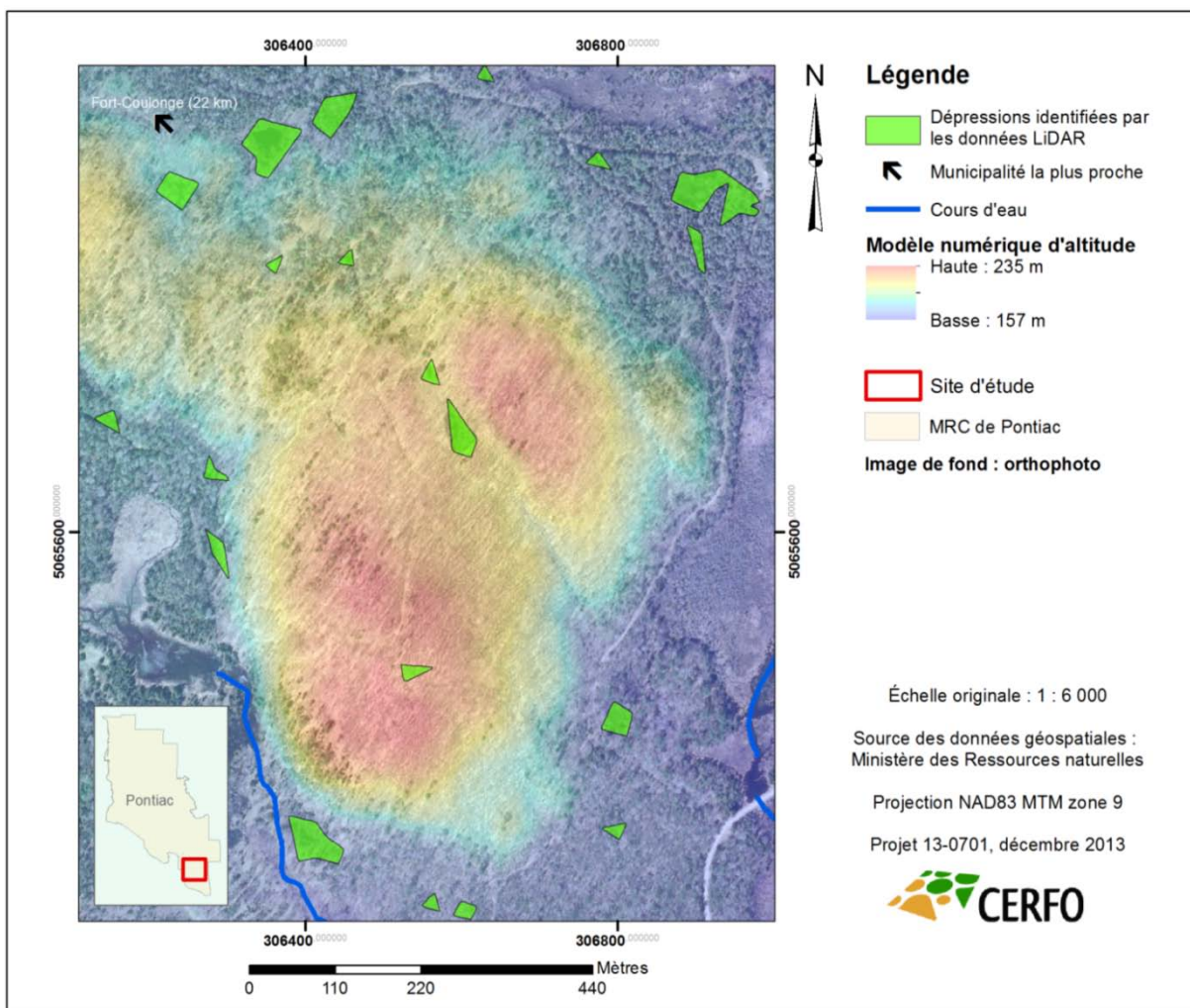


Figure 2 : Carte des dépressions identifiées par les analyses LiDAR

2.2. CARTOGRAPHIE DES ÉTANGS VERNAUX PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

La photo-interprétation a permis d'identifier 6 étangs vernaux d'une taille moyenne de 1 130 m² (figure 3). On retrouve les étangs vernaux sur la colline du centre sur la carte et en bas de pente où la densité forestière est variable.

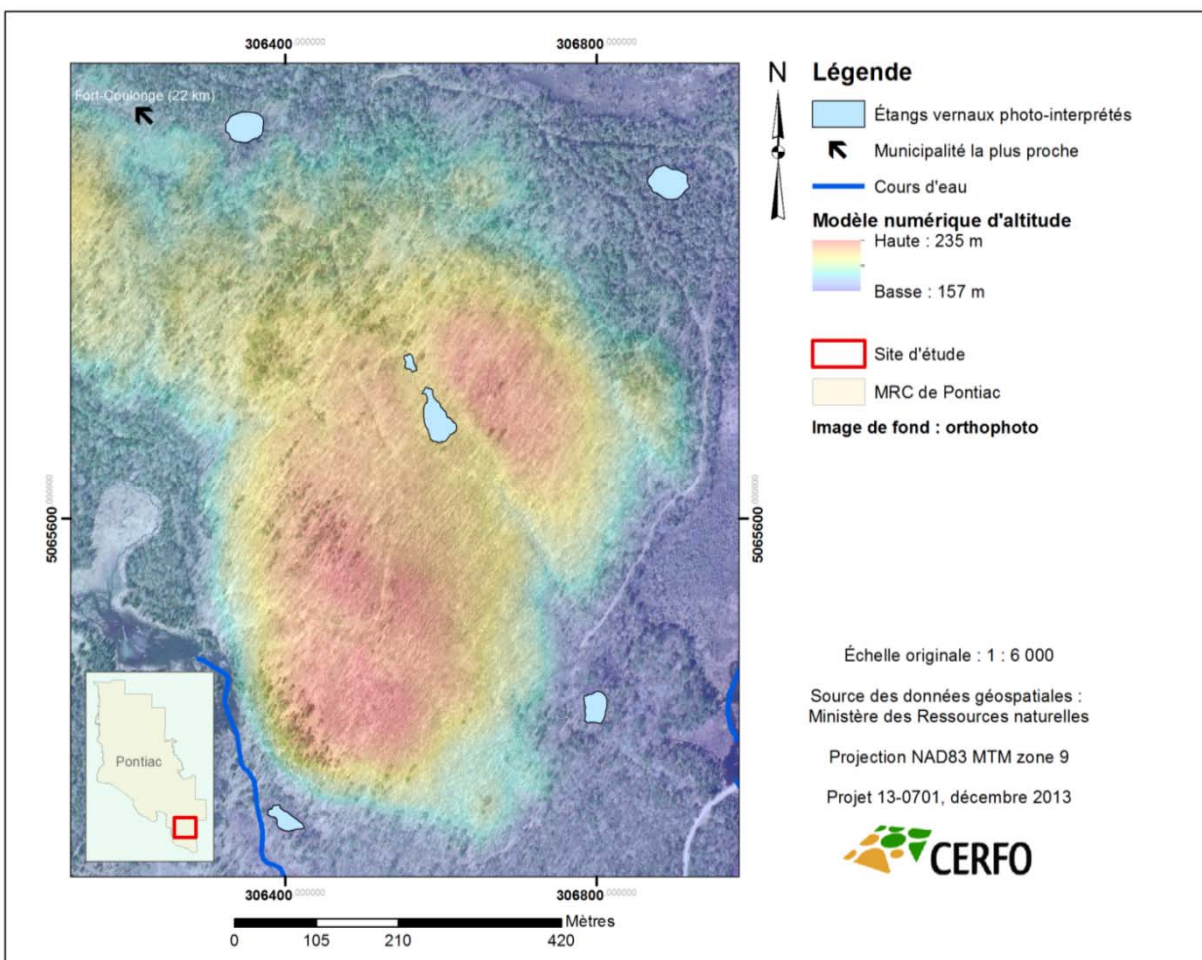


Figure 3 : Carte des étangs vernaux identifiés par la photo-interprétation

2.3. COMPARAISON DES RÉSULTATS (INDICATEUR D'ÉVALUATION)

La figure 4 montre les étangs vernaux photo-interprétés et les dépressions identifiées par les analyses LiDAR. On peut y voir la correspondance entre les deux méthodes et la différence de délimitation. Le nombre d'étangs vernaux détectés par les analyses LiDAR (20) est plus élevé que le nombre d'étangs identifiés à l'aide de la photo-interprétation (6). Lorsque l'on compare les

dépressions LiDAR aux étangs vernaux photo-interprétés (tableau 1), on remarque que pour chaque étang vernal identifié, une dépression LiDAR lui est associée; il n'y a donc aucun étang vernal avec une valeur nulle pour l'indicateur de précision. La couleur des étangs vernaux représente la valeur attribuée par l'indicateur d'évaluation. La moitié des étangs vernaux (1, 4 et 6) est associée à des dépressions LiDAR dont les limites ne correspondent pas aux surfaces inondées des étangs (indicateur de précision de 1) tandis que l'autre moitié (2, 3 et 5) chevauche des dépressions dont les limites correspondent de façon précise aux surfaces inondées des étangs (indicateur de précision de 2). Il est important de préciser que les limites délimitées par photo-interprétation dépendent des conditions hydrologiques lors de la prise des photos. L'hydro-période étant variable d'un étang à l'autre et d'une année à l'autre ainsi qu'en fonction des conditions météorologiques des derniers mois, et considérant la difficulté plus grande de détecter des étangs vernaux par photo-interprétation, seule une validation terrain permettrait de statuer sur le degré de précision des deux méthodes quant à la détection et la délimitation des contours de ces milieux humides temporaires. Il semble toutefois que le Lidar permette de détecter une plus grande quantité d'étangs vernaux potentiels que la photo-interprétation fine. Les dépressions identifiées par le LiDAR sont présentées en annexe 1.

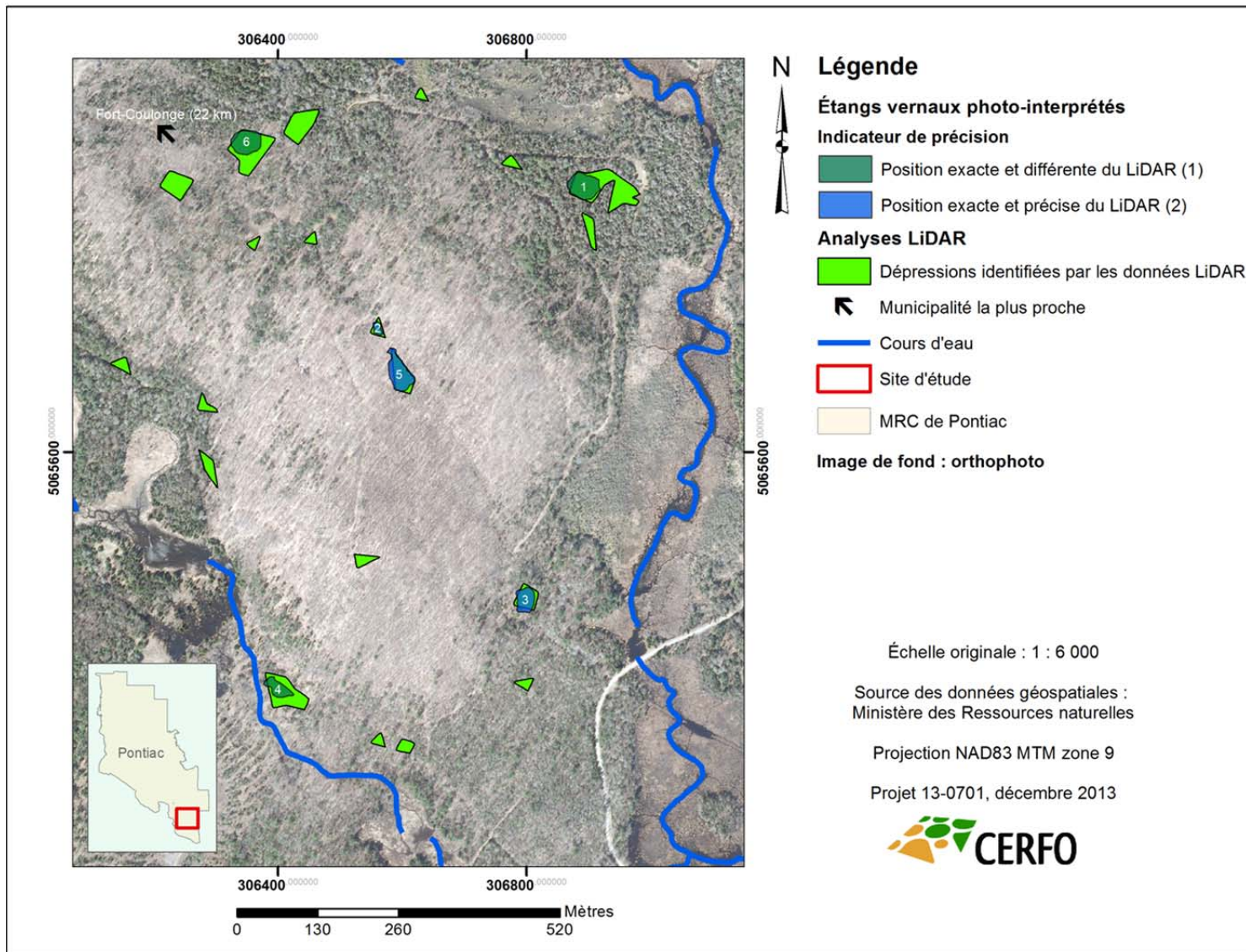


Tableau 1 : Résultats obtenus pour l'identification des étangs vernaux par la photo-interprétation fine et pour les dépressions par les analyses LiDAR

Étangs vernaux (photo-interprétation)	Superficie des étangs vernaux (m ²)	Superficie des dépressions (m ²) (LiDAR)	Indicateur de précision
1	1641	4082	1
2	224	383	2
3	977	1083	2
4	781	2471	1
5	1652	1415	2
6	1507	3094	1

Indicateurs de précision : 1 : position exacte mais superficie différente^a, 2 : position exacte et délimitation précise.

^a Le niveau d'imprécision entre la délimitation des dépressions et la superficie inondée des étangs est due en partie aux conditions météorologiques de l'hiver et du printemps et par conséquent, varie en fonction de l'année et du mois d'acquisition des données.

Les deux méthodes ont été comparées en termes de temps-personnes pour le traitement des données seulement, donc sans considérer l'intégration de celles-ci pour la correspondance des données (indicateur d'évaluation; tableau 2). On remarque que le temps de traitement nécessaire pour les analyses LiDAR est plus important (9 heures) que pour la photo-interprétation (5 heures). Par contre, comme le territoire à l'étude était de petite taille (100 ha), il y avait peu d'interprétation à faire. Ainsi, on estime qu'en appliquant ces méthodes à une plus grande superficie (1 000 ha), le temps de traitement des analyses LiDAR varierait peu (14 heures) alors que la photo-interprétation prendrait beaucoup plus de temps (50 heures).

Tableau 2 : Comparaison des deux méthodes (LiDAR et photo-interprétation) en termes de temps-personnes et estimation pour une plus grande superficie d'analyse

Traitement des données			
Analyses LiDAR	Temps personnes (heures)	Photo-interprétation	Temps personnes (heures)
Prétraitement	2	Prétraitement	1
Modèle numérique de terrain	2	Identification des étangs vernaux	4
Identification des dépressions	1		
Sélection par les critères	4		
Total (pour 100 ha)	9		5
Estimation pour une grande superficie (1 000 ha)	14		50

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet exploratoire a permis de constater qu'il y a plusieurs contraintes et limites à franchir afin d'améliorer la méthode d'identification des étangs vernaux de façon semi-automatisée. D'abord, l'identification des dépressions à partir des données LiDAR dépend beaucoup de la résolution du MNT issu de l'interpolation des points LiDAR. Il serait donc intéressant de comparer les résultats selon différentes résolutions. Ensuite, les étangs vernaux sont isolés du réseau hydrologique, mais aussi des autres milieux humides. Il faudrait donc s'assurer d'intégrer ces données dans la méthode si celles-ci sont disponibles. En effet, les milieux humides ne sont souvent pas cartographiés à une échelle fine et leur cartographie s'effectue généralement dans les secteurs plus peuplés comme les basses-terres du Saint-Laurent. En troisième lieu, plusieurs étangs vernaux ont une superficie inférieure à 200 m² et font moins de 1 m de profondeur (Colburn 2004). Ces petits étangs, selon leur hydro-période, peuvent être écologiquement importants. Ceux-ci ont également leur importance lorsqu'on se retrouve dans un contexte d'une mosaïque d'étangs vernaux impliquant des métapopulations. Le raffinement des méthodes de détection ainsi qu'une validation terrain et l'acquisition de nouvelles connaissances permettront dans le futur de fixer une superficie et une profondeur minimales et d'établir des normes de conservation. Le Lidar semble avoir le potentiel de détecter des mosaïques de très petits étangs, lesquelles ont une grande importance écologique. Finalement, les résultats démontrent que les étangs vernaux photo-interprétés sont toujours associés à une dépression identifiée par les analyses LiDAR. Le LiDAR ne peut donc pas être utilisé seul pour la cartographie des étangs vernaux, mais il est démontré qu'il possède un fort potentiel pour modéliser la topographie et ainsi supporter la présence de dépressions pour des étangs vernaux identifiés par une autre méthode. En effet, il serait très intéressant de combiner cette information LiDAR avec une cartographie indépendante des étangs vernaux (par exemple, une cartographie faite à partir de capteurs multispectraux (incluant la bande proche infrarouge) disponibles sur les avions ou encore sur les satellites comme Landsat ou Spot). Ainsi, la cartographie des étangs vernaux pourrait s'effectuer de façon semi-automatisée ou automatisée, ce qui permettrait d'économiser du temps par rapport à la photo-interprétation. Cette cartographie pourrait ensuite être combinée avec les analyses LiDAR pour améliorer l'exactitude de la classification.

Suite à l'analyse des résultats, nous recommandons de :

1. Appliquer l'analyse à une plus grande superficie contenant davantage d'éléments hétérogènes du paysage;
2. Utiliser la classe « eau » des données du LiDAR, idéalement acquises au printemps, pour analyser la profondeur des étangs vernaux et délimiter leurs frontières;
3. Analyser la bande infrarouge de capteurs multispectraux aériens ou satellitaires pour effectuer une cartographie semi-automatisée ou automatisée des étangs vernaux;
4. Combiner et comparer l'information du LiDAR avec des images satellitaires (Landsat, Spot, etc.);
5. Effectuer une validation terrain des étangs vernaux et des dépressions identifiés par la photo-interprétation fine et par les analyses LiDAR, à l'intérieur de la zone d'étude.

CONCLUSION

Le but du projet était d'explorer les possibilités qu'offre le LiDAR pour l'identification des étangs vernaux et d'en comparer les résultats avec ceux de la photo-interprétation fine. Les analyses LiDAR ont permis d'identifier des dépressions sur le territoire. L'application d'un filtre à chacune de ces dépressions a permis d'en réduire le nombre qui correspondait davantage aux étangs vernaux photo-interprétés. Tous ces étangs vernaux sont associés à une dépression, mais dans certains cas, la délimitation de celle-ci ne correspond pas aux limites déterminées par la photo-interprétation fine. L'objectif a donc été atteint, c'est-à-dire qu'il est possible d'utiliser le LiDAR pour établir un potentiel de présence d'étangs vernaux.

RÉFÉRENCES

- Bertacchi, W. et Maisonneuve, C. (2011) Document préparatoire – 24^e atelier sur la biodiversité. MRNF – Direction de l'expertise Faune-Forêts-Territoire du Bas-Saint-Laurent, 7 p.
- Brooks, R.T. and Hayashi, M. (2002) Depth-area-volume and hydroperiod relationships of ephemeral (vernal) forest pools in Southern New England. *Wetlands*, vol. 22, n^o 2, p. 247-255.
- Calhoun, A.J.K. and Klemens, M.W. (2002) Best development practices: Conserving pool-breeding amphibians in residential and commercial developments in the northeastern United States. MCA Technical Paper No. 5, Metropolitan Conservation Alliance, Wildlife Conservation Society, Bronx, New York, 63 p.
- Colburn, E.A. (2004) Vernal pools: natural history and conservation. McDonald and Woodward, Blacksburg, Virginia, 426 p.
- ESRI (2013) ArcGIS 10.1 Ressources : Vue d'ensemble du jeu d'outils Hydrologie. [En ligne] <http://resources.arcgis.com/fr/help/main/10.1/index.html#//009z0000004w000000>.
- Julian, J.T., Young, J.A., Jones, J.W., Snyder, C.D. and Wright, C.W. (2009) The use of local indicators of spatial association to improve LiDAR-derived predictions of potential amphibian breeding ponds. *Journal of Geographical Systems*, vol. 11, n^o 1, p. 89-106.
- Lathrop, R.G., Montesano, P., Tesauro, J. and Zarate, B. (2005) Statewide mapping and assessment of vernal pools: A New Jersey case study. *Journal of environmental management*, vol. 76, n^o 3, p. 230-238.

Lichvar, R.W., Finnegan, D.C., Newman, S. and Ochs, W. (2006) Delineating and Evaluating Vegetation Conditions of Vernal Pools Using Spaceborne and Airborne Remote Sensing Techniques, Beale Air Force Base, CA. US Army Corps of Engineers : Engineer Research and Development Center, 24 p.

Reif, M., Frohn, R.C., Lane, C.R. and Autrey, B. (2009) Mapping isolated wetlands in a karst landscape: GIS and remote sensing methods. *GIScience and Remote Sensing*, vol. 46, n° 2, p. 187-211.

Wang, Y.Z., Hong, W., Wu, C.Z., He, D.J., Lin, S.W. and Fan, H.L. (2008) Application of landscape ecology to the research on wetlands. *Journal of Forestry Research*, vol. 19, n° 2, p. 164-170.

ANNEXE 1. DÉPRESSIONS IDENTIFIÉES PAR LE LIDAR

Tableau A1 : Dépressions identifiées par le LiDAR

Dépressions	Profondeur (m)	Taille des dépressions (m ²)	Correspondance avec les étangs vernaux (photo-interprétation)
1	1,05	238	
2	2,19	1785	
3	1,68	338	
4	5,45	3094	6
5	3,51	1452	
6	2,58	4082	1
7	1,42	236	
8	1,55	220	
9	1,12	658	
10	1,32	383	2
11	1,10	431	
12	2,82	1415	5
13	2,37	420	
14	2,65	674	
15	1,22	473	
16	2,52	1083	3
17	2,01	325	
18	3,90	2471	4
19	1,21	270	
20	1,13	441	

La profondeur représente la différence d'altitude entre les points maximal et minimal de la dépression. Voir le tableau 1 pour la correspondance avec les étangs vernaux.