Programme d'Aide à la Recherche et au Transfert (PART)

Rapport méthodologique

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE D'ÉTANGS VERNAUX À L'AIDE DU LIDAR ET D'IMAGES MULTISPECTRALES

Présenté à :

Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie
Direction du soutien à l'innovation technologique et social

et

Société canadienne pour la conservation de la nature
Joel Bonin, directeur du Québec
Marie-Andrée Tougas-Tellier, chargée de projets

et

Canards Illimités Canada inc.
Bernard Fillion, directeur du Québec
Jason Beaulieu, chef géomatique

Par :

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.
Mathieu Varin, géomaticien, M.Sc.
Philippe Bournival ing.f., M.Sc.
Martin Dupuis, M.Sc.
Jean Fink, biol.

Mai 2016

© CERFO 2016-12

Mots-clés : étangs vernaux, territoire Kenauk, Outaouais, LiDAR, image satellitaire à haute résolution spatiale, classification orientée-objet, milieux humides

Référence à citer :
Varin, M., P. Bournival, M. Dupuis et J. Fink. 2016. Développement d'une méthode de cartographie d'étangs vernaux à l'aide du LIDAR et d'images multispectrales. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2016-12. 35 pages.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ 1

INTRODUCTION 3

OBJECTIFS 4

1. TERRITOIRES D'ÉTUDE 4

2. MÉTHODE 6

2.1. Données utilisées 6

2.2. Traitement d'images multispectrales 7

2.3. Traitement des données LiDAR 10

2.4. Combinaison des produits d'images multispectrales et du LiDAR 11

2.5. Validation des résultats sur le terrain 13

2.6. Compilation et analyses statistiques 13

3. RÉSULTATS 14

3.1. Classification orientée-objet des images multispectrales 14

3.2. Détection des dépressions avec les données LiDAR 18

3.3. Identification des étangs vernaux potentiels 20

3.4. Caractérisation biophysique des étangs vernaux potentiels 23

4. DISCUSSION 30

4.1. Apports de la méthode 30

4.2. Limite de la méthode 30

4.3. Pistes d'amélioration possibles 31

CONCLUSION 33

RÉFÉRENCES 34

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte du territoire d'étude 5
Figure 2 : Exemple d'une segmentation à une échelle fixée à 15. L'image de gauche représente une partie de la mosaïque d'images Pléiades à 2 m de résolution spatiale et l'image de droite sa segmentation. 15
Figure 3 : Carte des plans d'eau classifiés sur la mosaïque d'images satellitaires Pléiades du territoire Kenauk, par une classification orientée-objet 17
Figure 4 : Carte des dépressions générées à partir du MNT issu du LiDAR sur le territoire Kenauk 19
Figure 5 : Carte de la répartition des étangs vernaux potentiels 22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristique des images Pléiades 6
Tableau 2 : Informations sur la collecte des données LiDAR 7
Tableau 3 : Caractéristiques des zones d'entraînement utilisées dans la classification 14
Tableau 4 : Séparabilité spectrale entre les classes d'occupation du territoire 15
Tableau 5 : Statistiques des produits d'imagerie et du LiDAR pour le territoire complet 20
Tableau 6 : Statistiques des produits d'imagerie et du LiDAR pour le territoire de Kenauk 20
Tableau 7 : Statistiques des produits sélectionnés par critère pour le territoire complet 21
Tableau 8 : Statistiques des produits sélectionnés par critère pour le territoire de Kenauk 21
Tableau 9. Influence des critères de sélection des étangs vernaux 23
Tableau 10. Hydrographie des étangs vernaux 24
Tableau 11. Coefficient de distribution des essences à l'intérieur des étangs vernaux 25
Tableau 12. Coefficient de distribution des essences au pourtour des étangs vernaux 26
Tableau 13. Coefficient de distribution des critères fauniques 27
Tableau 14. Espèce d'oiseaux observées dans les étangs vernaux 27
Tableau 15. Espèce d'oiseaux observées sur le territoire Kenauk 28
Tableau 16 : Indicateurs de performance de la méthode pour l'identification d'étangs vernaux potentiels 29
Tableau 17 : Synthèse des indicateurs de performance de la méthode 29

RÉSUMÉ

Les étangs vernaux, aussi appelés étangs saisonniers, sont des milieux humides temporaires de petites superficies (Leonard *et al*., 2012; Julian *et al*., 2009). Ils sont formés par une dépression du terrain où l'eau s'accumule de façon temporaire et saisonnière. Ce 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 d'aménagement du territoire étant donné le manque d'information cartographique, leur état éphémère, leur isolement du réseau hydrologique et leur faible superficie. Conséquemment, il est difficile de les protéger. Plusieurs méthodes conventionnelles peuvent être utilisées pour cartographier les étangs vernaux, telle la photo-interprétation fine. Cette dernière est toutefois longue et relativement onéreuse lorsqu'appliquée à l'échelle du territoire.

Ce projet a exploré les méthodes semi-automatisées faisant appel à de nouvelles technologies, comme le LiDAR et l'imagerie satellitaire à haute résolution, pour réaliser la cartographie des étangs vernaux sur le territoire Kenauk en Outaouais. Le LiDAR permet en effet d'avoir une résolution fine au niveau du sol, ce qui améliore considérablement le résultat des analyses hydrologiques tandis que les images satellitaires printanières permettent de confirmer la présence d'eau dans les dépressions identifiées par le LiDAR. Dans un exercice normal de cartographie des milieux humides, seuls les milieux humides de 1 000 m² seraient cartographiés, mais l'avènement des nouvelles technologies permet désormais d'identifier les milieux humides de plus faible superficie comme c'est le cas avec ce projet.

Les résultats indiquent que les analyses LiDAR identifient davantage de dépressions que les analyses hydrologiques effectuées à partir de l'imagerie satellitaire. Ils indiquent que la présence d'eau évaluée à partir de l'image printanière est confirmée à 100 % des cas sur le terrain, mais que cette présence d'eau n'est pas toujours associée à des étangs vernaux. Les technologies prises individuellement identifient 50 % des étangs vernaux potentiels alors que la combinaison des images satellitaires et des dépressions LiDAR fait diminuer ce ratio à 33 %. On attribue ce niveau de précision dans les résultats à la sévérité des critères de sélection retenus lors des analyses. Des

options pour l'amélioration de la précision de la technique sont proposées. Les résultats soulignent également la diversité floristique et faunique des espèces fréquentant les étangs et l'importance d'avoir recours à un système de classification pour les caractériser. Ce système de classification permettra d'éliminer les confusions et de mieux documenter les différences entre les petits milieux humides.

INTRODUCTION

L'avènement des images satellitaires à haute résolution spatiale et du laser aéroporté, le « *Light Detection and Ranging* » (LiDAR), permettent de caractériser le territoire à une échelle beaucoup plus fine qu'auparavant. Ces nouvelles technologies seront de plus en plus utilisées pour caractériser une multitude d'attributs forestiers spécifiques, tels que les milieux humides (MH).

Le présent projet a exploré la capacité combinée des nouvelles technologies pour réaliser une cartographie fine des petits milieux humides sur le territoire Kenauk en Outaouais. Leur faible superficie (< 0,1 ha) contribue à la difficulté de les identifier et, par conséquent, de les protéger adéquatement (Julian et Young, 2009; Bertacchi et Maisonneuve, 2011). Souvent cachés par le couvert forestier, ils sont difficilement repérables malgré le recours aux photographies prises durant le printemps, où les feuilles ne sont pas encore présentes. C'est donc à partir des nouvelles technologies que les milieux humides temporaires, communément appelés les étangs vernaux ont été cartographiés de façon semi-automatisée à l'échelle du territoire Kenauk.

Bien que saisonniers, ces les étangs vernaux sont reconnus pour remplir d'innombrables fonctions écologiques. Ils constituent des habitats fauniques spécialisés en raison de leur isolement du réseau hydrographique. Cette caractéristique leur accorde une importance de plus en plus reconnue, notamment pour les habitats de reproduction d'invertébrés, d'amphibiens et de reptiles (Calhoun et Klemens, 2002; Lathrop *et al*., 2005). Les étangs vernaux sont également utilisés par la sauvagine pour se nourrir, notamment au printemps (Whitham *et al*., 1996). Certaines espèces fauniques en situation précaire sont aussi connues pour habiter ces milieux (Commonwealth of Massachusetts, 2014) ou sont susceptibles de les utiliser (Beaudry *et al*., 2009). Plusieurs programmes de certification environnementale reconnaissent l'importance des fonctions écologiques des étangs vernaux et recommandent de les considérer lors des opérations forestières (Leonard, 2012). La localisation des étangs vernaux est donc devenue primordiale.

Pour ce mandat, deux entreprises soucieuses de la protection et de la conservation des milieux humides ont désiré renforcer leur capacité en matière d'innovation et se sont associées au CERFO pour valider une technique de cartographie des milieux humides en utilisant le LiDAR

aéroporté et les images satellitaires à haute résolution spatiale. Le premier demandeur, la Société canadienne pour la conservation de la nature (CNC), principal partenaire dans cette étude, désirait cartographier les petits milieux humides sur ses propriétés privées afin de les protéger et de les prendre en considération dans leurs stratégies d'aménagement et de conservation du territoire. Le second demandeur, Canards Illimités Canada (CIC), désirait raffiner ses méthodes de photo-interprétation en utilisant le LiDAR aéroporté dans la délimitation des milieux humides.

OBJECTIFS

Le projet vise à développer une méthode semi-automatisée et rapide pour cartographier les étangs vernaux. De cet objectif principal découlent plusieurs objectifs spécifiques, soit :

1. Développer une approche pour faciliter, préciser, accélérer et homogénéiser l'identification des étangs vernaux;
2. Développer une méthodologie utilisant les produits dérivés du LiDAR en combinaison avec des images multispectrales pour :
    a. identifier les dépressions sur le territoire à l'étude
    b. identifier la présence d'eau dans ces dépressions
3. Contribuer au développement des outils géomatiques dans les cours offerts en technologie forestière du Cégep de Sainte-Foy, afin de contribuer à la formation des étudiants.

1. TERRITOIRES D'ÉTUDE

Le territoire Kenauk se situe dans la MRC de Papineau, à proximité des municipalités de Fasset et de Notre-Dame-de-Bonsecours (figure 1). Il s'agit d'une grande propriété privée (259 km²) couverte par une diversité importante d'essences forestières, de milieux humides et de lacs. Il est l'une des plus importantes et des plus anciennes réserves privées de faune au Canada et se distingue par sa richesse biologique en renfermant des forêts parmi les plus anciennes de l'Outaouais. On y trouve également des peuplements forestiers rares (ex. érables noirs) ainsi qu'une faune abondante et diversifiée, dont certaines espèces sont en situation précaire. L'exploitation forestière, le tourisme de nature haut de gamme, les activités de chasse et de pêche, la villégiature, la conservation et la mise en valeur de la faune et de ses habitats sont parmi

les activités actuellement pratiquées sur ce territoire. Enfin, le territoire Kenauk a la particularité de couvrir la presque totalité du bassin versant de la rivière Kinonge.

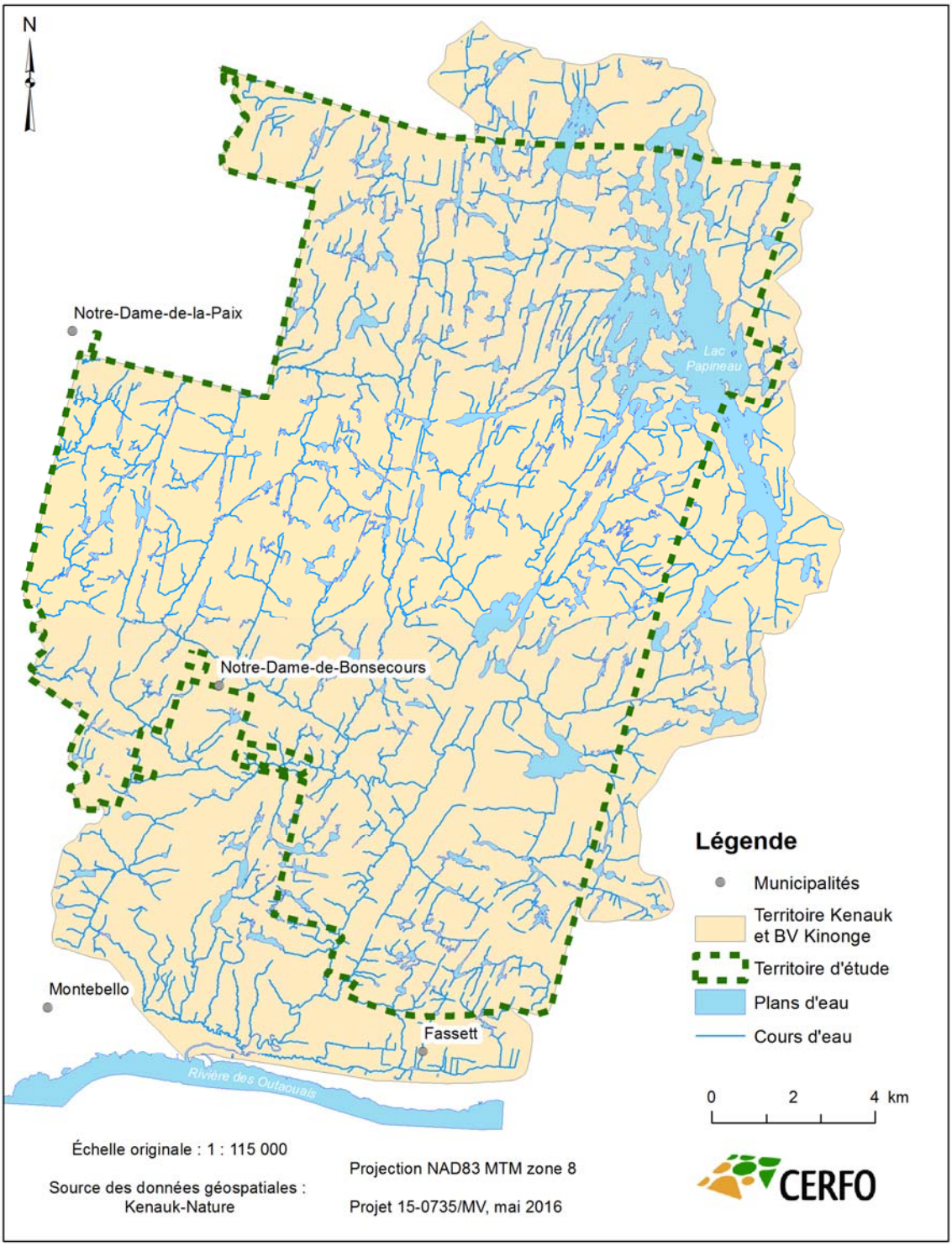

Figure 1: Carte du territoire d'étude

2. MÉTHODE

Les sections suivantes décrivent les données utilisées, les traitements effectués sur les images multispectrales et les données LiDAR, la combinaison des deux technologies, la validation sur le terrain et les analyses effectuées dans le cadre de cette étude.

2.1. DONNÉES UTILISÉES

Les images satellitaires multispectrales à haute résolution spatiale ont été utilisées en combinaison avec les données du LiDAR aéroporté pour localiser les étangs vernaux potentiels sur le territoire de Kenauk. Le premier jeu de données a servi à extraire l'information hydrique printanière du territoire et le second a permis de délimiter les dépressions potentielles.

2.1.1. Images satellitaires à haute résolution spatiale

Deux images satellitaires provenant du satellite Pléiades 1B ont été acquises le 6 mai 2015 à 12h10 (tableau 1). D'une résolution spatiale de 2 m x 2 m, les images distribuées par Spot Image ont été acquises par l'intermédiaire de l'entreprise Effigis Géo-Solution. Les prétraitements de base tels l'orthorectification et le mosaïquage ont été effectués avant la livraison des images. La couverture nuageuse de la mosaïque est inférieure à 1 %. L'acquisition printanière des images a permis d'obtenir un produit sans feuille pour mieux voir le sol et la présence d'eau sous la canopée forestière. Cette mosaïque a par la suite été utilisée pour la classification orientée-objet avec les canaux rouge, vert, bleu et proche infrarouge (RVB-PIR).

Tableau 1. Caractéristique des images Pléiades

Caractéristiques des images		
Date	Heure	Résolution spatiale
6 mai 2015	12h10	2x2 m
Canal	Spectre	Longueur d'onde (µm)
1	Bleu	430-550
2	Vert	490-610
3	Rouge	600-720
4	Proche infrarouge	750-950
5	Panchromatique	480-830

2.1.2. LiDAR aéroporté

Les données LiDAR aéroportées ont été recueillies en juin 2015 par l'entreprise Géolocation inc. Le nombre de retours captés du signal était de sept et la densité d'acquisition prescrite de huit points par mètre carré (tableau 2). Les données, en projection NAD83 MTM zone 9, ont été classifiées par l'entreprise Géolocalisation selon les classes suivantes : 01 – Non classifiées, 02 – Sol, 05 – Végétation haute, 6 – Bâtiments, 9 – Eau et 30 – Extérieur du périmètre.

Tableau 2 : Informations sur la collecte des données LiDAR

Items	Données
Date de prise de données	17 juin 2015
Type d'aéronef	Cessna 172
Hauteur moyenne de vol (m)	1200[1]
Type de système laser	Riegl Q-780
Nombre de retours	7
Densité (points/m²)	8
Nombre de classes	6

2.1.3. Données auxiliaires

Les données du réseau hydrologique linéaire et surfacique provenant du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ), de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ) et du Système d'informations écoforestières (SIEF : 3e inventaire) ont été combinées et utilisées pour documenter la présence des plans d'eau permanents sur le territoire d'étude. Ces données auxiliaires ont servi de base pour les analyses spatiales qui ont permis d'isoler les étangs vernaux du réseau hydrologique permanent et de ne garder que ceux qui étaient à plus de 10 m de celui-ci. Quant aux données linéaires, les cours d'eau intermittents ont été retirés de l'analyse, car un étang vernal pourrait y être attaché. Une vérification visuelle a été effectuée pour s'assurer que les données auxiliaires étaient à jour.

2.2. TRAITEMENT D'IMAGES MULTISPECTRALES

L'approche par classification orientée-objet a été utilisée pour documenter le réseau hydrique printanier. Cette approche consiste à faire des regroupements homogènes de pixels en objets et à attribuer ensuite une classe à chaque objet de la mosaïque d'images.

[1] Mesurée par rapport au niveau du sol.

2.2.1. Identification des zones d'entraînement

La première étape comporte une délimitation des zones d'entraînement servant à produire la classification orientée-objet de la mosaïque d'images. Il s'agit d'identifier des zones homogènes représentant de l'eau sur la mosaïque d'images, selon des classes d'occupation du territoire. La délimitation de ces zones d'entraînement a été réalisée avec *ArcGIS* par image-interprétation sur la mosaïque d'images aériennes prises en mai 2015. Les zones retenues devaient avoir préférablement une superficie minimale de 60 mètres carrés et être réparties uniformément sur l'ensemble du territoire d'étude. Ainsi, les classes suivantes ont été retenues :

- Plan d'eau libre;
- Plan d'eau surexposé:
- Autre classe (tout ce qui n'est pas de l'eau).

Les plans d'eau ont dû être scindés en deux catégories distinctes considérant qu'à l'heure de la prise d'images, l'angle du soleil ainsi que celui du capteur ont créé une surexposition de l'image sur certains lacs. La réflectance observée étant différente entre les lacs, deux classes ont été retenues, soit les plans d'eau libres et ceux dont l'image de l'eau est surexposée. La catégorie autre classe sert à déterminer tout ce qui n'est pas de l'eau.

2.2.2. Calcul des indices spectraux

La deuxième étape représente le calcul des indices spectraux. L'utilisation de tels indices peut permettre de mieux discriminer certaines classes, notamment à différencier les milieux présentant de l'eau de ceux qui n'en présentent pas. Plusieurs indices ont été testés, mais un seul le *Normalized Diffenrence Vegetation Index (* NVDI) a permis d'ajouter une information pertinente.

Le (NDVI) a été calculé à partir des canaux de la mosaïque d'images Pléiades :

$$NDVI = \frac{Canal\ PIR - Canal\ R}{Canal\ PIR + Canal\ R}$$

où PIR et R sont, respectivement, les canaux spectraux du proche infrarouge et du rouge.

2.2.3. Analyse spectrale des zones d'entraînement

La troisième étape concerne l'analyse des signatures spectrales des zones d'entraînement. Cette étape a été réalisée en deux phases : d'abord par une analyse visuelle graphique des signatures spectrales et de leur différence interclasse (outil *Semi-Automatic Classification* développé par Congedo *et al.*, 2013, dans le logiciel QuantumGIS), et ensuite, par la confrontation de ces signatures spectrales dans un outil statistique pour évaluer leur séparabilité lors d'une classification (indice de Bhattacharyya de PCI Geomatics). Cette confrontation est appliquée en fonction de diverses combinaisons de canaux afin de sélectionner la combinaison optimale. Cette analyse permet donc de déterminer si les classes associées à ces zones d'entraînement se distinguent bien les unes des autres ce qui aura des répercussions par la suite sur la classification.

2.2.4. Segmentation de la mosaïque d'images

La quatrième étape de la classification orientée-objet vise la segmentation de la mosaïque d'images. La mosaïque est découpée en objets correspondant à des regroupements de pixels présentant des caractéristiques semblables. Cette étape constitue la base de la méthode orientée-objet et permet d'intégrer dans l'analyse non seulement des éléments spectraux, mais aussi spatiaux. Pour ce faire, une échelle est sélectionnée permettant d'établir la taille des objets souhaitée ainsi que des paramètres de forme et de couleur des objets.

2.2.5. Assignation des classes d'occupation

La classification des objets a été réalisée avec l'algorithme de « machine à vecteurs de support », *Support Vector Machine* (SVM). Cet algorithme analyse les objets afin d'y déceler des patrons. En effet, à partir d'objets identifiés par les zones d'entraînement, l'algorithme construit un modèle pour distinguer toutes les classes. Il s'agit de créer des classes les moins corrélées possible et d'assigner une classe à chaque objet. L'analyse spectrale a permis d'orienter le choix des classes à utiliser lors de la classification. Pour ce faire, la classification SVM a été utilisée en deux temps. D'abord, il fallait distinguer les classes de manière grossière. Dans ce cas, certaines classes peuvent se confondre entre elles. Ensuite, une seconde classification est appliquée pour affiner le résultat précédent afin de cibler les classes qui sont pertinentes pour l'étude. L'outil d'optimisation multidimensionnel d'*eCognition Developer* a été utilisé pour déterminer les combinaisons les plus efficaces des paramètres de classification. Pour les indices spectraux, en plus du NDVI, les moyennes des canaux RVB-PIR ont été utilisées par objet. Les indices

spatiaux ont également été utilisés, spécialement pour réduire la confusion. Cette approche permet d'associer une classe d'occupation du territoire à chaque objet.

2.3. TRAITEMENT DES DONNÉES LIDAR

Les données LiDAr ont été traitées à l'aide d'outils hydrologiques de QGIS (QGIS Development Team, 2009) et d'ArcGIS (ESRI, 2013). Les données brutes, en format .las, ont fait l'objet d'une interpolation afin de créer un modèle numérique de terrain (MNT) qui illustre l'altitude du sol (MNT) sur l'ensemble du territoire à l'étude. C'est à partir de ce MNT que toutes les dépressions du territoire ont été calculées.

2.3.1. Production du modèle numérique de terrain

Le MNT a été généré à partir des données brutes du LiDAR. En fonction de l'espacement moyen[2] et de la densité[3] des points altimétriques du LiDAR, une résolution spatiale a été proposée. Plus la densité de points est élevée et plus les valeurs d'espacement de points sont faibles, ce qui permet d'utiliser une résolution spatiale plus petite. L'espacement moyen a été mesuré en tenant compte des tuiles des points LiDAR exemptes de lacs afin de s'assurer que l'espacement n'était pas influencé par les milieux hydriques où il n'y a généralement pas de points LiDAR. De plus, les frontières du territoire d'étude ont été considérées dans l'interpolation, de manière à s'assurer de créer le moins d'anomalies possible. La méthode de triangulation est la meilleure pour éviter les trouées et la mieux adaptée au MNT. Cette méthode peut s'apparenter à celle utilisée par Maxa (2009) qui a utilisé une interpolation *spline* avec le minimum local du dernier retour (Lee 1997; Hjelle, 2001). Cette méthode a permis de mieux définir les zones où il n'y avait pas de points, notamment en utilisant une fenêtre de sélection utilisant le minimum local.

Les données brutes ont été filtrées en ne retenant que le dernier retour des classes sol et non assignées. Une fois la sélection de ces points effectuée, trois résolutions spatiales ont été testées pour les interpolations du MNT : 1 m, 3 m et 5 m. Une fois les MNT calculés, un filtre spatial de type passe-bas (3 x 3) a été appliqué sur tout le territoire afin de corriger les irrégularités du terrain causées par l'absence de points. Cela a pour effet d'atténuer les fausses

[2] L'espacement moyen (EM) se définit en tant qu'unités linéaires entre les points altimétriques du LiDAR.
[3] La densité de points se définit en tant que points par surface unitaire carrée, elle se calcule comme suit : $1/EM^2$.

représentations des petites dépressions qui pourraient correspondent à des anomalies d'interpolation. Enfin, le filtre morphologique moyen de Wu *et al*. (2014) a été utilisé pour filtrer le MNT. Ce filtre a permis d'enlever les dépressions d'artéfacts (correspond au *fill sink* d'ArcGIS).

2.3.2. Création des dépressions

La création des dépressions a été effectuée à partir du MNT filtré à l'étape précédente. Ces dépressions ont servi de références pour identifier les cuvettes intéressantes pouvant accumuler de l'eau. D'abord, deux algorithmes de SAGA (*Fill sinks xxl* de Qang et Liu et *Sink drainage route detection*), intégrés dans QGIS, ont été utilisés. Ces derniers couvrent plus de territoire et créent des dépressions plus compactes que les dépressions issues des algorithmes d'ArcGIS. Les cuvettes ont ensuite été extraites de ces produits et ont été lissées (*smooth peak* à 10 m de tolérance) pour générer une couche utilisable dans les analyses.

2.4. COMBINAISON DES PRODUITS D'IMAGES MULTISPECTRALES ET DU LIDAR

La combinaison des produits d'images multispectrales et du LiDAR a permis de faire une sélection spécifique afin d'obtenir des ÉV potentiels. Le traitement des données LiDAR a en effet permis de faire un portrait des dépressions sur le territoire. Puisque ce ne sont pas toutes ces dépressions qui peuvent accumuler l'eau, les résultats obtenus du LiDAR ont donc été croisées avec l'analyse hydrique des images multispectrales afin de s'assurer que les dépressions démontraient une présence d'eau. La section suivante décrit les critères de sélection qui ont été utilisés pour discriminer la présence des étangs vernaux potentiels.

2.4.1. Identification des critères de sélection

Le premier critère retenu pour la sélection des dépressions est la taille de celles-ci. La cartographie de Canards illimités Canada (CIC) inclut les MH de plus de 1000 m^2 (0,1 ha) alors que Julian *et al*. (2008) considèrent les dépressions jusqu'à 50 m^2. Il est donc suggéré de considérer les dépressions entre 50 et 1000 m^2. Également, seules les dépressions formant des complexes de plus de 200 m^2 (Varin *et al*., 2013) ont été retenues. Pour être considérés comme un étang vernal faisant partie d'un complexe, les étangs vernaux, au minimum deux, devaient être distancés à moins de 30 m les uns des autres.

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 retenue par rapport au réseau hydrologique pour déterminer l'isolement est 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 permettait d'accumuler l'eau. La définition d'un étang vernal caractérisée par sa profondeur est très variable. Néanmoins, plusieurs auteurs s'accordent pour attribuer une profondeur au moins supérieure à 0,1 m et généralement inférieure à 1 m (Bertacchi et Maisonneuve (2011); Brooks et Hayashi (2002); Faccio *et al*. (2009); Lichvar *et al*. (2006) et We *et al*. (2014). Les dépressions ayant une différence de hauteur entre 0,1 m et 1 m ont donc été retenues.

Le quatrième critère de sélection, directement lié au troisième, déterminait quelles dépressions 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. Contrairement à Varin *et al*. (2013) qui se sont servi d'étangs vernaux identifiés par photo-interprétation pour calculer l'aire de drainage minimale, ces bornes ont été établies en fonction de la littérature, par rapport aux superficies d'étangs vernaux recherchées. Pour être plus contraignant sur la profondeur maximale de l'eau et le réseau hydrologique, nous avons utilisé une aire contributrice variant entre 50 et 5 000 m^2.

Le dernier critère de sélection est le croisement entre les produits d'images multispectrales et du LiDAR. Les classes de plans d'eau issues de la classification orientée-objet ont servi pour déterminer si la dépression avait une présence d'eau au printemps. Une distance inférieure à 5 m entre les classes de plans d'eau et les dépressions a été utilisée pour cibler les ÉV potentiels.

2.5. VALIDATION DES RÉSULTATS SUR LE TERRAIN

La présence temporaire de l'eau dans les étangs vernaux a été validée à partir d'un inventaire terrain effectué au mois de juin 2015 par l'équipe affectée au projet, soit un technicien forestier et un étudiant du CÉGEP de Sainte-Foy en technologie forestière. L'échantillonnage a été effectué à partir des résultats de l'analyse hydrique réalisée sur les images multispectrales à haute résolution spatiale. L'objectif principal de la campagne de terrain était de valider la présence d'eau dans les polygones identifiés par la classification orientée-objet, mais aussi de qualifier les étangs vernaux en notant des informations sur leur alimentation en eau, la présence d'un complexe, la présence d'arbres vivants et de chicots, la profondeur de l'étang, le type de peuplement forestier environnant, la présence de castors et autres groupes d'espèces fauniques tels les amphibiens et avifaune à proximité. De plus, tous les étangs vernaux non identifiés par les analyses hydriques de l'image printanière ont été notés et localisés par des points GPS sur le terrain afin de comparer ces résultats avec l'analyse des dépressions identifiées par le LiDAR.

2.6. COMPILATION ET ANALYSES STATISTIQUES

Les informations recueillies durant la campagne de terrain ont été saisies dans une base de données utilisée pour documenter l'environnement entourant les étangs vernaux. Les résultats cartographiques des étangs vernaux provenant des analyses hydriques et des dépressions ont été comparés entre eux afin de documenter leur performance à identifier les étangs vernaux,ce qui a permis de valider l'exactitude de leur combinaison pour cartographier des étangs vernaux et leurs biais potentiels. Un indicateur de performance inspiré des critères de Wu *et al.* (2014) a été utilisé pour documenter la qualité cartographique des étangs vernaux :

- l'étang a été détecté par les deux technologies;
- l'étang a été détecté par l'une des deux technologies;
- l'étang a été détecté par l'une ou l'autre des deux technologies, mais est situé à moins de 30 m;
- l'étang n'a pas été détecté.

3. RÉSULTATS

Les résultats de la classification orientée-objet, l'identification des dépressions avec le LiDAR, l'identification des étangs vernaux potentiels et la caractérisation biophysique des étangs vernaux sont décrits dans les sections suivantes.

3.1. CLASSIFICATION ORIENTÉE-OBJET DES IMAGES MULTISPECTRALES

L'identification des zones d'entraînement, l'analyse spectrale des zones d'entraînement, la segmentation de la mosaïque d'images et l'assignation des classes d'occupation sont décrites.

3.1.1. Identification des zones d'entraînement

Une sélection des zones d'entraînement a permis de localiser un total de 111 zones réparties dans les différentes classes d'occupation du territoire. La classe « autres » comprend tout ce qui n'est pas de l'eau, soit les milieux résineux, feuillus, anthropiques, humides et l'ombre. Le tableau 3**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** décrit sommairement les statistiques des classes. Les classes d'eau possèdent entre 12 et 15 zones, pour une superficie moyenne variant de 625 m² à 1154 m² alors que la classe « autres » possède 84 zones d'entraînement d'une superficie moyenne de 677 m². Ces critères correspondent aux cibles minimales de Jensen (2005). Chacune de ces zones homogènes a été choisie selon une technique aléatoire et stratifiée.

Tableau 3 : Caractéristiques des zones d'entraînement utilisées dans la classification

Nom de la classe	Code de la classe	Nombre de zone par classe	Superficie moyenne par zone (m²)
Autres	05	84	677
Plan d'eau libre	61	12	625
Plan d'eau glacé	62	15	1154

3.1.2. Analyse spectrale des zones d'entraînement

Une analyse visuelle graphique des signatures spectrales a permis dans un premier temps de déterminer quelles bandes allaient être utilisées pour effectuer la classification. Ainsi, la bande du PIR a été privilégiée pour identifier la classe de plans d'eau libre et la bande verte pour identifier la classe de plans d'eau surexposée. Dans un deuxième temps, une analyse de la séparabilité spectrale des classes, représentée par le tableau 4Tableau 3, montre que les classes sont très bien séparées (valeur supérieure à 1,7). Cette analyse met en évidence les points suivants :

- Les classes de plans d'eau (libre et surexposée) sont très bien séparées entre elles ;

- Les classes de plans d'eau (libre et surexposée) sont très bien séparées de la classe « autres » ;

Cette analyse, répétée avec plusieurs combinaisons de bandes spectrales, a démontré qu'en utilisant les bandes du bleu et du PIR et en intégrant l'indice NDVI, nous obtenons la meilleure séparabilité moyenne. En effet, l'indice de Bhattacharyya moyen est de 1,99, ce qui est excellent car le maximum de séparabilité est de 2,0.

Tableau 4 : Séparabilité spectrale entre les classes d'occupation du territoire

Classes	Autres	Eau libre
Eau libre	2,00	
Eau surexposée	1,96	2,00

3.1.3. Segmentation de la mosaïque d'images

Lors de l'approche orientée-objet, une segmentation de la mosaïque d'images a permis de segmenter le territoire en objets, à une échelle relativement adaptée aux MH. L'algorithme *multiresolution* de *eCognition Developer* a été utilisé lors de la segmentation. Certains objets issus de la segmentation ont ensuite été combinés à des objets voisins, en fonction de leur écart spectral. Cette segmentation a produit plus de 2 823 000 objets d'une taille moyenne de 126 m^2. Elle a également permis de réaliser la classification à l'échelle des petits MH (figure 2). En effet, les paramètres choisis pour segmenter la mosaïque d'images ont permis d'identifier toutes les zones d'une superficie plus fine ayant un certain degré d'humidité.

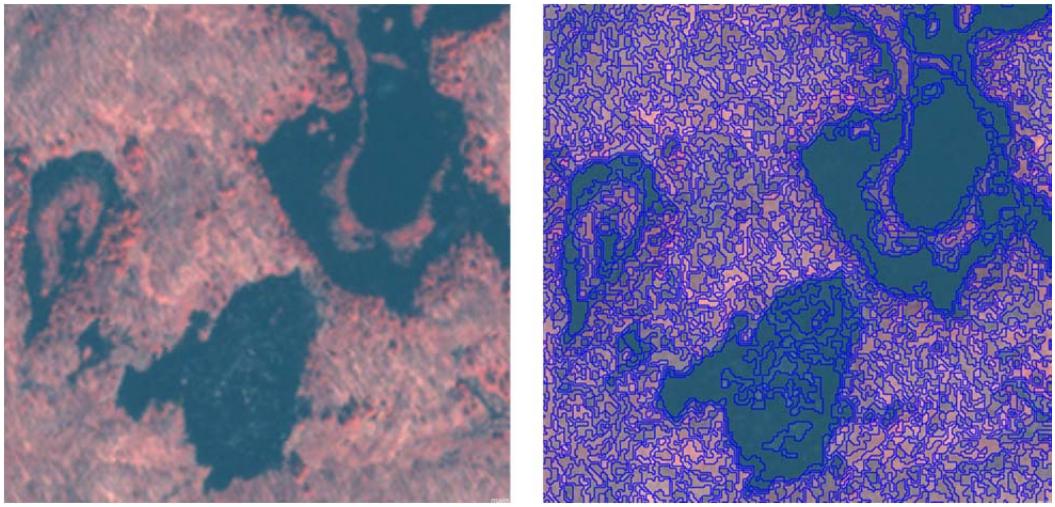

Figure 2 : Exemple d'une segmentation à une échelle fixée à 15. L'image de gauche représente une partie de la mosaïque d'images Pléiades à 2 m de résolution spatiale et l'image de droite sa segmentation.

3.1.4. Assignation des classes d'occupation

L'approche orientée-objet nécessite en finalité une assignation des classes d'occupation du territoire dans le but d'attribuer une classe à chacun des objets générés lors de la segmentation. La figure 3 illustre le résultat final de la cartographie des plans d'eau issue d'une combinaison des classes de plans d'eau libre et surexposée. Toutes les zones où l'eau était visible sur l'image ont été cartographiées. On voit, en effet, qu'autant les grands lacs que les petits plans d'eau ont été identifiés.

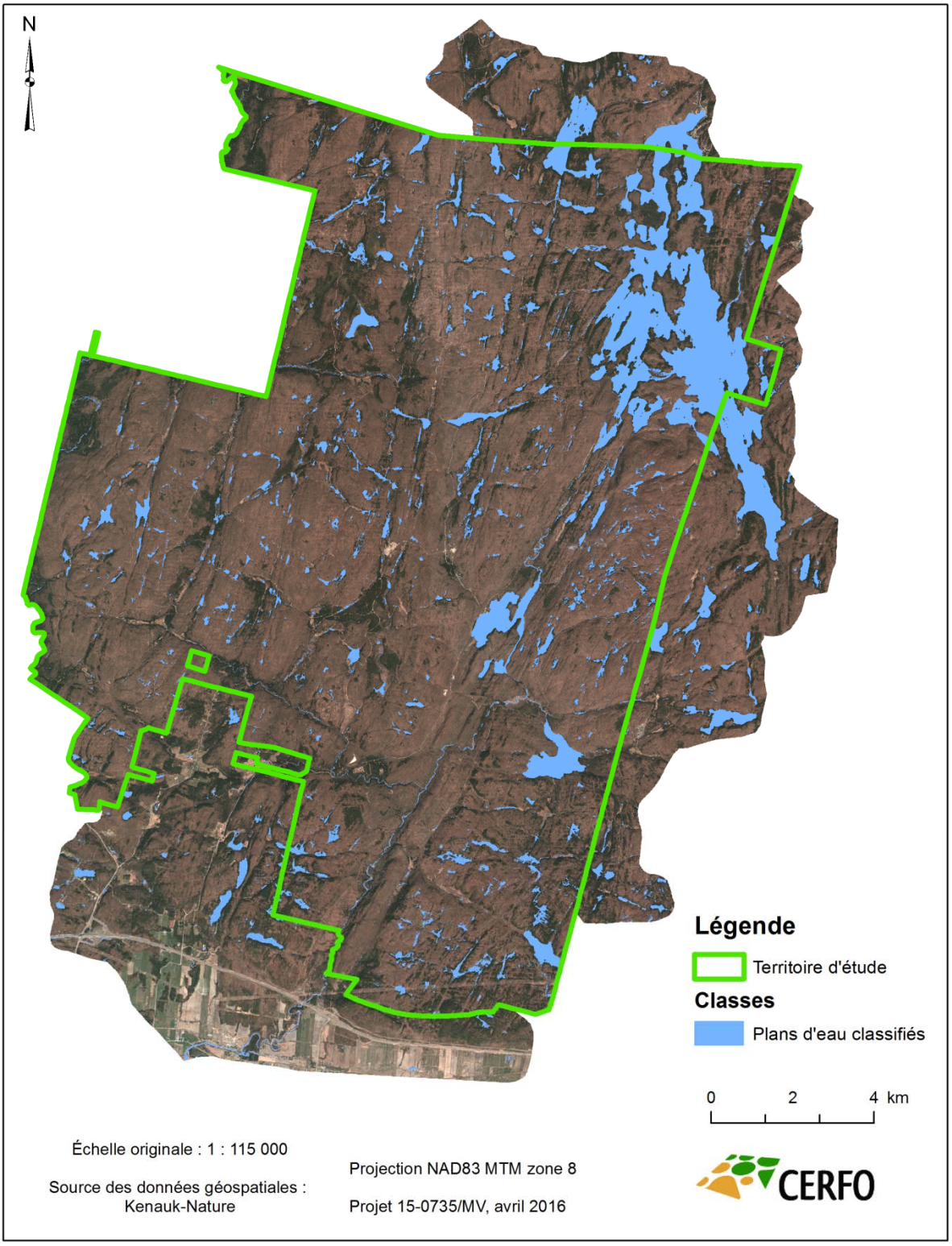

Figure 3 : Carte des plans d'eau classifiés sur la mosaïque d'images satellitaires Pléiades du territoire Kenauk, par une classification orientée-objet

3.2. DÉTECTION DES DÉPRESSIONS AVEC LES DONNÉES LIDAR

Le MNT a été généré à partir des données LiDAR, en tenant compte des classes du sol et des points non classifiés, car plusieurs de ces derniers étaient présents dans les MH. Le MNT à 3 m a été privilégié après plusieurs tests car c'est avec cette résolution spatiale que la délimitation des dépressions était optimale. Cette résolution correspond également à 3 fois l'espacement moyen des points sur le territoire. Un filtre médian a été utilisé sur ce MNT, dans une fenêtre circulaire avec un rayon de 4 m, pour éliminer les dépressions d'artéfact et consolider la morphologie des plus grosses dépressions. À partir de ce MNT filtré, les dépressions ont été calculées avec deux algorithmes de QGIS. La figure 4 illustre les dépressions identifiées sur le territoire qui se situent principalement dans le fond des vallées.

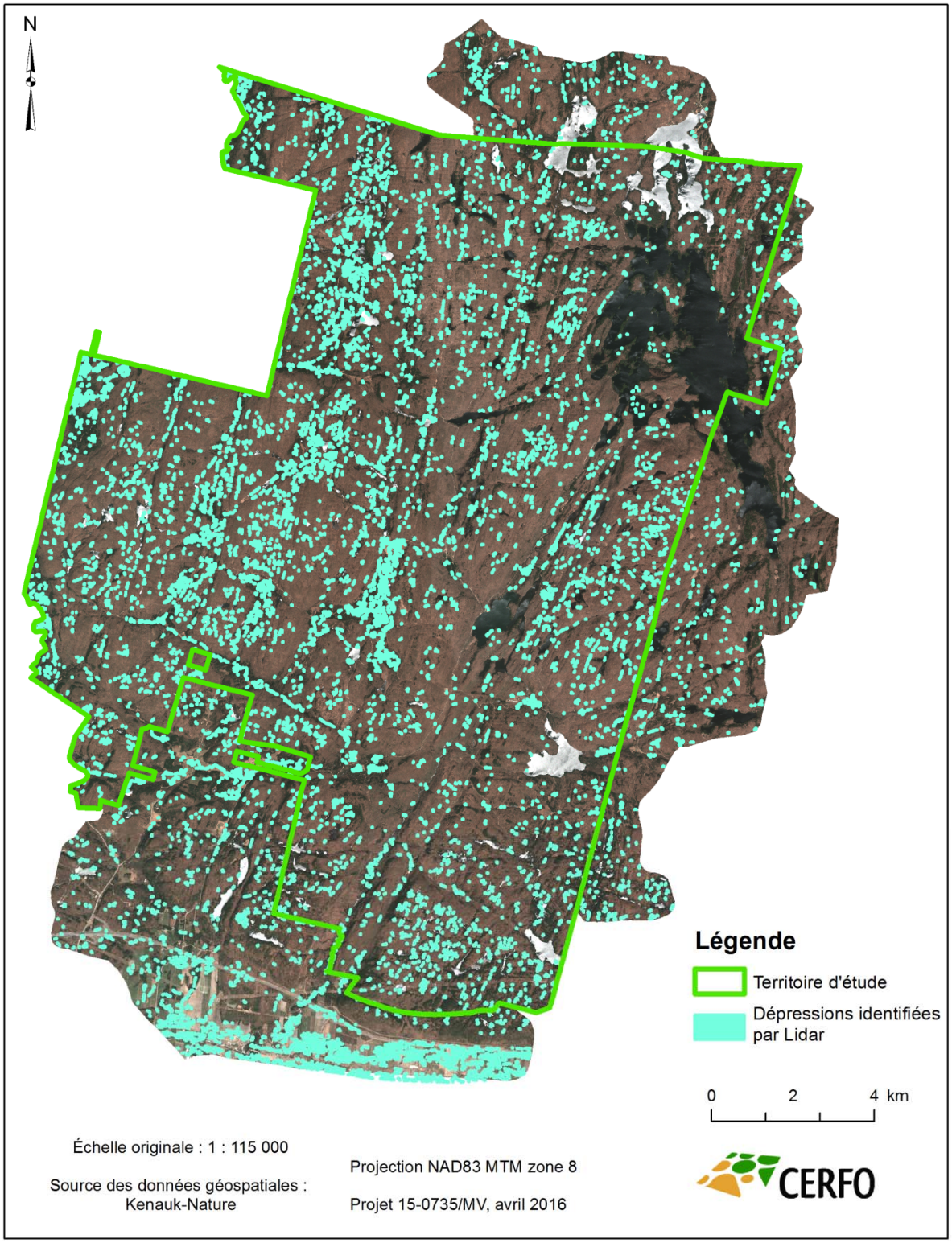

Figure 4 : Carte des dépressions générées à partir du MNT issu du LiDAR sur le territoire Kenauk

3.3. IDENTIFICATION DES ÉTANGS VERNAUX POTENTIELS

Les analyses LiDAR ont permis d'obtenir un grand nombre de dépressions sur le territoire. Plusieurs critères ont été utilisés afin de réduire ce nombre et de parvenir à sélectionner des étangs vernaux potentiels. Les tableaux suivants montrent les statistiques des polygones issus du traitement d'image, des analyses LiDAR et de leur combinaison, pour tout le territoire couvert par la mosaïque d'image (tableau 5) et pour le territoire de Kenauk (tableau 6). En analysant ces tableaux, on remarque que les complexes sont moins nombreux et ont une superficie moyenne plus élevée que les polygones individuels. D'ailleurs, le nombre de polygones obtenus suite à la combinaison des deux technologies a été passablement réduit. En effet, cette diminution est due à liaison des deux produits, mais également par l'utilisation des 5 critères de sélection. Les tableaux 7 et 8 démontrent le raffinement des polygones suite à l'accumulation des critères de sélection pour, respectivement, le territoire complet et celui de Kenauk. Chaque critère est très restrictif et le nombre d'ÉV potentiels final permet d'être plus confiant sur ce résultat.

Tableau 5 : Statistiques des produits d'imagerie et du LiDAR pour le territoire complet

	Produits imagerie (plans d'eau)			Produits LiDAR (dépressions)			Combinaison (ÉV potentiels)		
	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy.(ha)	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy.(ha)	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy.(ha)
Polygones	3561	90	0,03	73662	4626	0,06	313	8	0,02
Complexes de polygones	598	69	0,12	3637	3061	0,84	46	2	0,06

Tableau 6 : Statistiques des produits d'imagerie et du LiDAR pour le territoire de Kenauk

	Produits imagerie (plans d'eau)			Produits LiDAR (dépressions)			Combinaison (ÉV potentiels)		
	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy.(ha)	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy.(ha)	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy.(ha)
Polygones	2212	60	0,03	52346	3413	0,07	223	5	0,02
Complexes de polygones	345	47	0,14	3435	2657	0,77	42	2	0,05

Tableau 7 : Statistiques des produits sélectionnés par critère pour le territoire complet

Critères cumulatifs	Étangs vernaux potentiels		
	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy. (ha)
Critère #1 - Superficie	18049	417,01	0,02
Critère #2 - Isolement	12393	275,86	0,02
Critère #3 - Profondeur	7910	143,77	0,02
Critère #4 - Drainage	5402	96,84	0,02
Critère #5 - Présence eau	313	7,64	0,02

Tableau 8 : Statistiques des produits sélectionnés par critère pour le territoire de Kenauk

Critères cumulatifs	Étangs vernaux potentiels		
	Nombre	Superf. (ha)	Superf. Moy. (ha)
Critère #1 - Superficie	12671	295,24	0,02
Critère #2 - Isolement	8098	182,10	0,02
Critère #3 - Profondeur	5022	85,58	0,02
Critère #4 - Drainage	3441	56,28	0,02
Critère #5 - Présence eau	223	5,42	0,02

La figure 5 illustre la distribution des étangs vernaux sur le territoire. On remarque qu'ils sont répartis sur l'ensemble du territoire. À noter également le nombre d'étangs vernaux potentiels non négligeable au sud, dans la zone agricole.

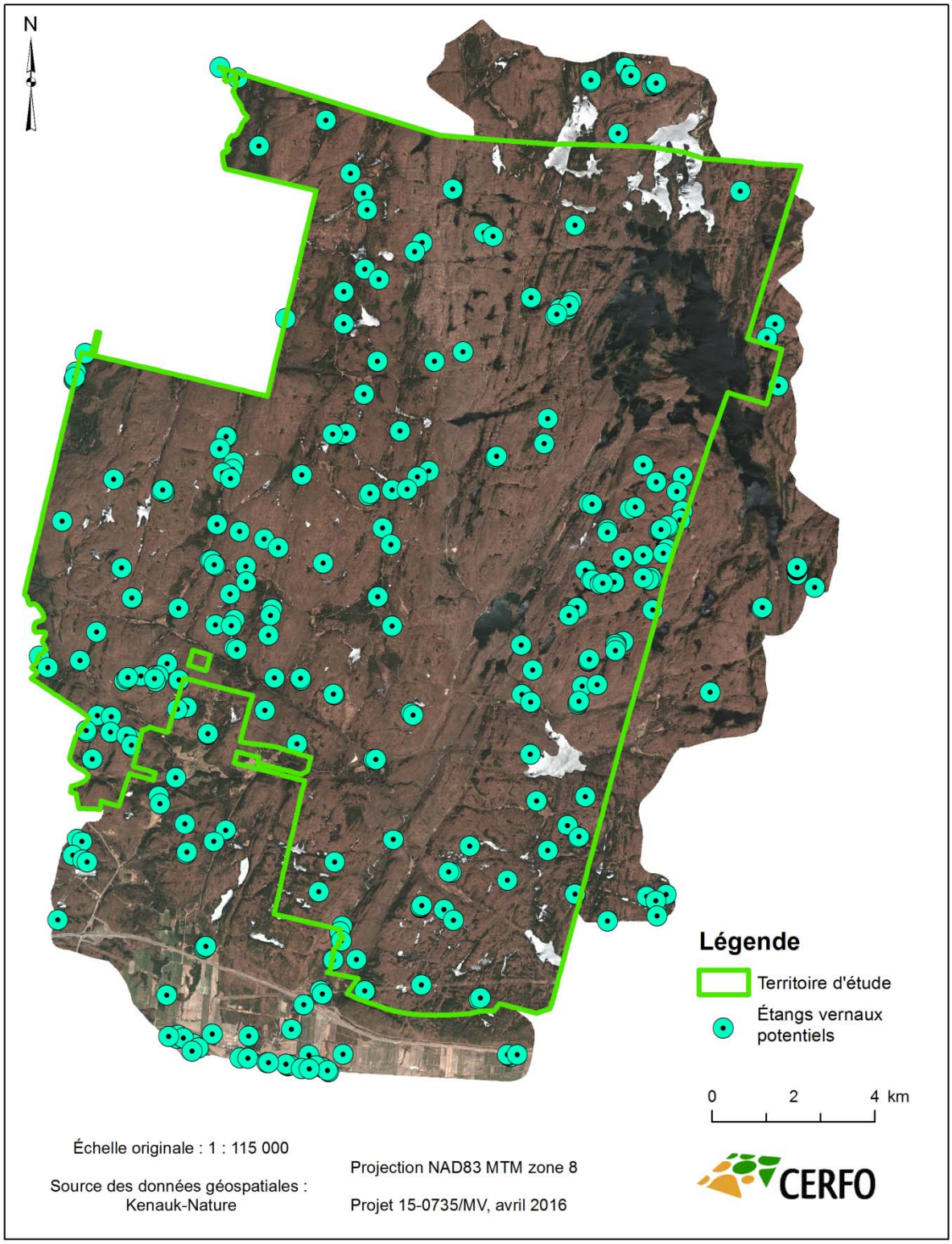

Figure 5 : Carte de la répartition des étangs vernaux potentiels

3.4. CARACTÉRISATION BIOPHYSIQUE DES ÉTANGS VERNAUX POTENTIELS

La campagne de terrain a permis de visiter et de caractériser 128 étangs vernaux potentiels. De ces 128 milieux humides, 89 ont été détectés à partir des images satellitaires et 39 nouveaux sites ont été rajoutés par l'équipe technique en déplacement sur le terrain. La consigne consistait à échantillonner les nouveaux sites et de prendre un point GPS lorsque les étangs vernaux ne figuraient pas sur la classification de l'image. Des 128 étangs vernaux potentiels visités sur le terrain, seulement 49 possèdent les caractéristiques typiques d'un étang vernal. Ce sont donc ces étangs qui ont servi à caractériser l'hydrographie et noter les observations sur la flore et la faune. La section sur les indicateurs de performance décrit la correspondance spatiale entre les observations terrain, les dépressions provenant du LiDAR aéroporté et l'hydrographie identifiée sur l'image satellitaire. La section sélection des étangs vernaux présente un sommaire des critères ayant servi à la sélection des étangs vernaux pour les analyses.

3.4.1. Sélection des étangs vernaux

Les critères de présence d'eau au printemps, d'un cours d'eau permanent, d'étangs à castor actif, de grenouillette (*Limnobiumsp.)*, de nénuphars (*Nymphea sp.)* et de profondeur de l'étang ont été utilisés pour effectuer une sélection des étangs vernaux. Les étangs vernaux présentant l'un ou plusieurs de ces critères ont été retirés des analyses. Le tableau 9 présente l'influence de ces critères dans la sélection des sites étudiés. Les résultats indiquent que la présence d'eau a été confirmée sur 100 % des échantillons. La présence d'un cours d'eau permanent est responsable de l'annulation de 11 % des étangs vernaux identifiés par l'image. La grenouillette et les nénuphars ont été repérés dans 30 % des petits milieux humides alors que les étangs à castor représentent 61 % des cas. Enfin, 29 % des étangs vernaux potentiels avaient plus d'un 1 m de profondeur. Au total, des 89 petits milieux humides prospectés à partir de l'image, seulement 13 possèdent les caractéristiques des étangs vernaux. Ce sont donc à partir de ces 13 étangs vernaux et des 36 étangs vernaux identifiés par GPS que les caractéristiques des étangs vernaux ont été décrites dans les sections suivantes.

Tableau 9. Influence des critères de sélection des étangs vernaux

Source	Nombre d'EV	Présence d'eau	Présence d'un cours d'eau permanent	Présence d'étang à castor actif	Présence de grenouillette et/ou nénuphars	Profondeur > 1m	Nombre d'EV restant
Image	89	100 %	11 %	61 %	30 %	29 %	13
Point GPS	39	100 %	0 %	6 %	3 %	4 %	36

3.4.2. Hydrographie

L'alimentation en eau des milieux humides visités, la présence d'un complexe et la profondeur de l'étang à partir de la limite des hautes eaux ont été utilisées pour décrire l'hydrographie des étangs vernaux. Les résultats sont présentés en deux parties, soient les étangs vernaux identifiés par l'image satellitaire et les étangs vernaux identifiés par GPS. Les résultats indiquent une différence dans la profondeur des étangs vernaux et la présence d'un complexe selon les sources d'identification. En effet, la moyenne des profondeurs des étangs vernaux identifiés à partir des images satellitaires est de 74 cm alors qu'elle est de 34 cm pour les étangs vernaux identifiés par GPS (tableau 10). Les résultats indiquent une autre différence entre l'image et le GPS alors que 46 % des observations identifiés par l'image satellitaire étaient situées dans un complexe contre 8 % pour le GPS. Enfin, les résultats indiquent qu'il y a respectivement 23 et 19 % des étangs vernaux qui sont alimentés par cours d'eau intermittent en fonction de l'image et du GPS respectivement. Au total, il y a en moyenne 20 % des étangs vernaux qui sont alimentés par un cours d'eau intermittent.

Tableau 10. Hydrographie des étangs vernaux

Source	Nombre d'EV	Profondeur moyenne (cm)	IC	Alimentation par un cours intermittent (%)	Présence d'un complexe (%)
Image	13	74	31	23 %	46 %
Pts GPS	36	34	22	19 %	8 %
Total	**49**	**44**	**30**	**20 %**	**18 %**

3.4.3. Flore

La présence d'arbres vivants et de chicots a été utilisée pour qualifier la flore observée à l'intérieur et au pourtour des étangs vernaux. À l'intérieur des étangs vernaux, 11 espèces ont été observées dont les plus fréquentes sont le frêne noir, l'érable rouge et l'épinette noire (tableau 11). Ces dernières ont la caractéristique commune d'être des espèces indicatrices de milieux au drainage imparfait.

Tableau 11. Coefficient de distribution des essences à l'intérieur des étangs vernaux

	Pts GPS		Image	
Essence	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**
Bouleau jaune	6 %	8 %	0 %	0 %
Bouleau à papier	9 %	10 %	0 %	0 %
Épinette noire	**6 %**	**8 %**	**17 %**	**22 %**
Érable de Pennsylvanie	3 %	6 %	0 %	0 %
Érable rouge	**17 %**	**13 %**	**8 %**	**17 %**
Érable à sucre	3 %	6 %	0 %	0 %
Frêne noir	**23 %**	**14 %**	**8 %**	**17 %**
Hêtre à grandes feuilles	9 %	10 %	0 %	0 %
Ostryer de Virginie	3 %	6 %	0 %	0 %
Saules sp.	3 %	6 %	0 %	0 %
Thuya occidental	0 %	0 %	8 %	17 %

Le tableau 12 présente le coefficient de distribution des essences observées au pourtour des étangs vernaux. Des 21 espèces arborescentes observées, les plus fréquentes sont le hêtre à grandes feuilles, l'érable rouge, l'érable à sucre, le bouleau jaune et le frêne noir. Les espèces indicatrices du domaine bioclimatique de l'érablière à tilleul ont également été observées comme le cerisier tardif, le chêne rouge, le frêne d'Amérique et le tilleul. Ces résultats soulignent que la diversité arborescente de l'érablière à tilleul est très bien représentée.

Tableau 12. Coefficient de distribution des essences au pourtour des étangs vernaux

	Pts GPS		Image	
Essence	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**
Bouleau jaune	**46 %**	17 %	**67 %**	28 %
Bouleau à papier	17 %	13 %	58 %	30 %
Cerisier tardif	6 %	8 %	8 %	17 %
Chêne rouge	14 %	12 %	25 %	26 %
Épinette noire	6 %	8 %	17 %	22 %
Érable de Pennsylvanie	60 %	17 %	0 %	0 %
Érable rouge	**69 %**	16 %	**100 %**	0 %
Érable à sucre	**66 %**	16 %	**83 %**	22 %
Frêne d'Amérique	3 %	6 %	8 %	17 %
Frêne noir	**34 %**	16 %	**42 %**	30 %
Hêtre à grandes feuilles	**83 %**	13 %	**75 %**	26 %
Ormes d'Amérique	3 %	6 %	0 %	0 %
Ostryer de Virginie	9 %	10 %	0 %	0 %
Peuplier baumier	3 %	6 %	0 %	0 %
Peuplier à grandes dents	6 %	8 %	0 %	0 %
Peuplier faix-tremble	6 %	8 %	0 %	0 %
Pin blanc	0 %	0 %	17 %	22 %
Cerisier de Pennsylvanie	3 %	6 %	0 %	0 %
Pruche du Canada	3 %	6 %	8 %	17 %
Thuya occidental	0 %	0 %	8 %	17 %
Tilleul d'Amérique	6 %	8 %	17 %	22 %
Chicots bois mort	**37 %**	**17 %**	**67 %**	**28 %**

Parmi les espèces floristiques non ligneuses observées, mais non quantifiées, on note l'iris versicolore, l'adiante du Canada, l'osmonde cannelle et une espèce de droseras.

3.4.4. Faune

La visite des milieux humides a permis de documenter la présence d'amphibiens, de castor, de de différents oiseaux observés à proximité (tableau 13). Les oiseaux et la présence d'amphibiens devaient être observés directement alors que les castors et le grand pic étaient indiqués par des signes de présences. Aucun inventaire systématique n'a été réalisé.

Tableau 13. Coefficient de distribution des critères fauniques

	Pts GPS		Image	
Critère faunique	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**
Présence d'amphibien	40 %	17 %	75 %	26 %
Ancien étang à castor	20 %	14 %	83 %	22 %
Présence de trou d'alimentation	14 %	12 %	67 %	28 %
Présence du grand pic	17 %	13 %	67 %	28 %
Présence de nichoir	6 %	8 %	25 %	26 %

Parmi les 8 espèces d'oiseaux observées directement dans les étangs vernaux, on note que le Pic flamboyant (*Colaptes auratus* **)** et la Paruline masquée (*Geothlypis trichas*) ont été observés plus souvent. La Paruline azurée (*Dendroica cerulea**)***, encore inobservée à Kenauk, a également été identifiée (tableau 14).

Le tableau 15 présente une synthèse des espèces d'oiseaux observées sur le territoire Kenauk. Au total en 2015, 25 espèces d'oiseaux ont été observées directement sur le territoire, dont les plus remarquables et encore inobservées à ce jour à Kenauk, le Passerin indigo (*Passerina cyanea*) et la Paruline azurée (*Dendroica cerulea).* Répertoriés officiellement à une seule reprise, le Canard colvert (*Anas platyrynchos**)*** et l'Engoulevent bois-pourri (*Caprimulgus vociferus*) font également partie des espèces vedettes du printemps 2015.

Tableau 14. Espèce d'oiseaux observées dans les étangs vernaux

Espèces d'oiseaux observées	N observations
Pic flamboyant *(Colaptes auratus)*	**5**
Paruline masquée **(***Geothlypis trichas)*	**5**
Quiscale bronzé (*Quiscalus quiscula)*	2
Pic maculé (*Sphyrapicus varius)*	2
Jaseur d'Amérique (*Bombycilla cedrorum)*	2
Grive solitaire (*Catharus guttatus)*	2
Geai bleu (*Cyanocitta cristata)*	1
Paruline azurée (*Dendroica cerulea)*	1

Tableau 15. Espèce d'oiseaux observées sur le territoire Kenauk

Liste des espèces d'oiseaux vues et observées à kenauk
Canard colvert (*Anas platyrynchos)*
Harle huppé (*Mergus serrator*)
Grand Héron (*Ardea herodias)*
Petite Buse *(Buteo platypterus)*
Buse à queue rousse (*Buteo jamaicensis)*
Chouette rayée (*Strix varia)*
Engoulevent bois-pourri (*Caprimulgus vociferus*)
Martin-pêcheur d'Amérique (*Megaceryle alcyon)*
Pic maculé (*Sphyrapicus varius)*
Pic chevelu (*Leuconotopicus villosus)*
Pic flamboyant *(Colaptes auratus)*
Grand Pic *(Hylatomus pileatus*)
Moucherolle phébi (*Sayornis phoebe*)
Tyran huppé (*Myiarchus crinitus*)
Geai bleu (*Cyanocitta cristata)*
Corneille d'Amérique (*Corvus brachyrhynchos*)
Grand Corbeau *(Corvus corax)*
Grive solitaire (*Catharus guttatus)*
Merle d'Amérique (*Turdus migratorius)*
Jaseur d'Amérique (*Bombycilla cedrorum)*
Paruline masquée **(***Geothlypis trichas)*
Paruline azurée *(Dendroica cerulea).*
Paruline à collier (*Setophaga americana)*
Passerin indigo (*Passerina cyanea*)
Quiscale bronzé (*Quiscalus quiscula)*

Parmi les autres espèces fauniques observées, mais non quantifiées, on note la couleuvre rayée (*Thamnophis sirtalis)* et la grenouille verte (.*Lithobates (Rana) clamitans melanota)* Des traces d'ours noir et un nid de Paruline masquée (*Geothlypis trichas)* ont également été observés près des étangs vernaux.

3.4.5. Indicateurs de performance

La campagne de terrain a permis de valider plusieurs ÉV potentiels. Les ÉV validés sur le terrain correspondent à 12 objets préalablement détectés par le traitement d'image et 36 nouveaux points GPS relevés à leur position sur le terrain. Une évaluation a donc pu être réalisée dans le but de déterminer si tous ces ÉV validés ont été détectés par le traitement d'image, LiDAR et par la

combinaison de ces deux technologies (tableau 16). Les critères de sélection étant très restrictifs, il était prévisible qu'un bon nombre d'ÉV ne soient pas détectés par les méthodes. Il est par contre important que ceux identifiés par les méthodes soient effectivement des étangs vernaux. Globalement, 33 % des ÉV validés sur le terrain ont été détectés par la combinaison des deux technologies. Environ la moitié a été identifiée comme étant une dépression à partir du LiDAR. La moitié des ÉV avait également une présence d'eau cartographiée par le traitement d'image (tableau 17).

Tableau 16 : Indicateurs de performance de la méthode pour l'identification d'étangs vernaux potentiels

	Produits LiDAR (dépressions)			Produits imagerie (plans d'eau)			Combinaison (ÉV potentiels)		
Type	ND	D <30m	D	ND	D <30m	D	ND	D <30m	D
Pts GPS (36)	22	11	3	25	11	0	30	6	0
Objets (13)	3	4	6	0	0	13	3	4	6
Total (49)	25	15	9	25	11	13	33	10	6

ND : non détecté; D : détecté

Tableau 17 : Synthèse des indicateurs de performance de la méthode

	Produits LiDAR (dépressions)	Produits imagerie (plans d'eau)	Combinaison (ÉV potentiels)
Pts GPS	39 %	31 %	17 %
Image	77 %	100 %	77 %
Total	49 %	49 %	33 %

4. DISCUSSION

Les apports de la méthode, les limites et les pistes d'améliorations possibles sont documentés dans les sections suivantes.

4.1. APPORTS DE LA MÉTHODE

L'interprétation de photographies aériennes comporte plusieurs limites et, par conséquent, plusieurs étangs vernaux peuvent être omis lors de la cartographie traditionnelle (Calhoun et de Maynadier, 2004), et ce, même sur un petit territoire. Certaines études portent sur l'utilisation d'images multispectrales satellitaires pour délimiter les étendues d'eau sur le territoire de façon rapide (Frazier et Page, 2000; Lathrop *et al*., 2005). Bien que cette méthode soit efficace pour détecter la présence d'eau, elle n'est pas assez précise pour distinguer les étangs vernaux des autres milieux humides permanents. Malgré le défi lié à l'utilisation de nouvelles technologies tel le LiDAR, celui-ci est mis à contribution pour déterminer des dépressions où l'eau pourrait potentiellement s'accumuler (Paine *et al*., 2013). Pourtant, très peu d'études proposent de combiner ces deux technologies, comme c'est le cas dans notre méthode.

Lichvar *et al*. (2006) utilisent, dans un premier temps, des images multispectrales pour délimiter les étangs vernaux et se servent ensuite du LiDAR pour confirmer s'ils forment une dépression. Toutefois, comme les étangs vernaux sont très petits et souvent recouverts en partie par la canopée, la délimitation à partir d'images multispectrales ne peut qu'être imprécise. C'est pourquoi notre étude porte d'abord sur une délimitation par LiDAR, donc une identification fine de la dépression et une confirmation de la présence d'eau par l'analyse d'images. L'avantage principal de cette méthode par rapport à celle utilisée par Lichvar *et al*. (2006) est que les traitements du LiDAR permettent de délimiter relativement bien les dépressions sans être influencés par la variable temporelle (Varin *et al*., 2014). Également, cette méthode permet de réduire l'influence de la variabilité qui est due à la date de l'image.

4.2. LIMITE DE LA MÉTHODE

Le nombre d'étangs vernaux potentiels identifiés est influencé par plusieurs facteurs, dont les conditions climatiques, telles que l'intensité des pluies avant la prise d'image. Effectivement, la cartographie de l'eau n'est possible que si elle est visible du ciel lors de l'acquisition des images

satellitaires. Ainsi, les étangs vernaux étant très dynamiques, il est possible que cette méthode sous-estime leur quantité. A l'inverse, on sait que le traitement LiDAR pour détecter les dépressions a souvent tendance à surestimer les MH. C'est pourquoi plusieurs critères ont été appliqués de manière à être sévères dans la sélection d'étangs vernaux potentiels.

La combinaison des deux technologies peut aussi présenter certaines incertitudes. Par exemple, l'erreur de géoréférencement des images satellitaires étant de l'ordre de 5 m, il est possible que la présence d'eau dans l'ÉV ne corresponde pas parfaitement avec la dépression. C'est pourquoi il est important de déterminer une distance de proximité en tenant compte de cette limite (Reif *et al*., 2009). Pour contrer cette imprécision, un rayon de recherche de 5 m a été ajouté au dernier critère de sélection des dépressions, à savoir, la correspondance entre la présence d'eau cartographiée par traitement d'images, et les dépressions identifiées par les analyses LiDAR. Un rayon de recherche à 10 m aurait très bien pu être utilisé afin d'augmenter la correspondance entre la présence d'eau sur l'image et les dépressions. Cependant, cette méthode aurait généré plus d'étangs vernaux potentiels et donc plus de validation terrain.

Il est également important de mentionner que plusieurs points GPS pris sur le terrain, qui correspondaient à des ÉV, mais qu'aucune dépression identifiée n'y concordait correctement. En effet, il n'a pas été possible d'établir qu'il y avait de l'eau sur l'image satellitaire printanière, car la résolution spatiale utilisée ne le permettait pas. La méthode de cartographie de l'eau et la classification orientée-objet, étaient essentielles pour réaliser la campagne de terrain, en identifiant des zones à valider, mais contribue aussi à cette limite, car elle omet les surfaces d'eau très petites. Les nouveaux ÉV validés par GPS étaient souvent très petits (moins de 200 m^2) et avaient une faible profondeur d'eau (34 cm en moyenne).

4.3. PISTES D'AMÉLIORATION POSSIBLES

La méthode développée présente des limites, mais suite à ce projet, plusieurs solutions peuvent être proposées. La limite principale concerne le caractère dynamique et temporel des ÉV. L'utilisation du LiDAR permet justement d'analyser le terrain et de produire des résultats quasi intemporels. Par contre, la validation sur le terrain démontre une imprécision non négligeable de la technique d'analyse. Ainsi, il est recommandé de tester l'utilisation d'images à plus haute résolution spatiale, telle que 50 cm, comme le permet l'image panchromatique du capteur satellite Pléiades. Ensuite, il est proposé de faire les analyses à partir des données LiDAR pour détecter les dépressions avant la cartographie de l'eau et la validation.

Alternativement, des indices spectraux pourraient être utilisés à partir de l'imagerie satellitaire pour leur inférer une valeur limite correspondant au niveau d'humidité du sol (Wu *et al*., 2014). Cela permettrait de créer une banque de valeurs pour ces indices en fonction des ÉV retrouvés sur le terrain, selon leur humidité et la présence d'arbres dans l'étang. Une autre possibilité serait de faire un démixage spectral sur l'image satellitaire de manière à détecter les portions d'humidité dans chaque pixel.

Il est également proposé d'affiner les critères de sélection des dépressions pour obtenir des ÉV potentiels. Ces critères peuvent effectivement être moins sévères et plus inclusifs en tenant compte d'une campagne de terrain élargie, mesurant ces critères. Par exemple, la profondeur de l'eau ne correspond pas parfaitement à la profondeur de la dépression, car celle-ci représente la limite maximale du niveau d'eau. Il faudrait donc mesurer la profondeur de la dépression pour correspondre aux ÉV. La présence d'eau étant essentielle durant le printemps, il importe de savoir si cette eau perdure à l'été. Pour ce faire, une cartographie de l'eau à l'été doit être réalisée à partir d'une image d'été, idéalement du même capteur que celui utilisé lors de l'acquisition de l'image printanière. Un autre critère pourrait aussi être ajouté pour restreindre les ÉV potentiels aux milieux naturels, comme c'est le cas dans l'étude de Lichvar *et al*. (2006) qui ont utilisé la proximité aux éléments anthropiques comme contrainte pour la présence d'ÉV.

Comme les petits milieux humides (< 1 000 m²) renferment toutes les catégories de milieux humides, il est recommandé d'en faire la caractérisation en utilisant le système de classification développé par Canards Illimités Canada Inc. Ce système prévoit l'utilisation de 7 classes de milieux humides dans lesquelles les étangs vernaux seraient ajoutés pour former un système de classification bonifiée à 8 classes. Ainsi, les classes de ce système seraient : eau peu profonde, marais, prairie humide (sous-classe de marais), marécage, tourbière ombrotrophe (bog), tourbière minérotrophe (fen), tourbière boisée et étang vernal comme 8e et nouvelle classe. Avant d'être officiellement utilisé, ce système de classification devra être validé sur le terrain afin d'éviter les confusions entre les classes. Cette validation permettra d'identifier les différentes techniques entre les classes semblables aux étangs vernaux tels les tourbières boisées, les petites prairies humides et les marécages boisés. Cela permettra de raffiner la description des étangs vernaux et de l'intégrer dans un système de classification déjà éprouvé.

CONCLUSION

Le projet a permis de développer une méthode semi-automatisée pour cartographier les étangs vernaux sur le territoire Kenauk en Outaouais. La conception d'une méthode hybride de traitement à partir d'image satellitaire à haute résolution spatiale et du LiDAR constitue le caractère le plus innovant de ce projet. La participation d'un professeur du département de technologie forestière du CÉGEP de Sainte-Foy a permis d'explorer de nouveaux axes, dont le développement de nouveau matériel pédagogique en lien avec l'utilisation du LiDAR. Ce projet a également permis une proximité entre la formation des étudiants et la recherche appliquée tout en leur permettant d'effectuer des stages en entreprises.

La méthode développée pour cartographier les ÉV s'est avérée satisfaisante, en combinant deux technologies, soit le traitement d'images multispectrales satellitaires et les analyses LiDAR. Cette étude a permis d'identifier 223 ÉV potentiels sur le territoire de Kenauk. La validation terrain effectuée a permis d'en conclure que la méthode est très sévère et qu'elle ne détecte pas tous les ÉV présents sur le terrain. Il serait intéressant de poursuivre la validation et de raffiner les critères de sélection afin de vérifier si les ÉV potentiels identifiés par la combinaison des deux technologies constituent effectivement des ÉV sur le terrain. Cela permettrait de quantifier le degré de précision de la méthode bonifiée.

Finalement, dans le contexte où la conservation de la biodiversité et le développement durable sont au centre de plusieurs enjeux, la création d'une telle approche s'avère un outil intéressant pour les gestionnaires afin de se doter de nouveaux moyens pour associer les nouvelles technologies de télédétection à leur processus de gestion. En effet, le recours à ces technologies de pointe (LiDAR et images satellitaires) s'avère une avenue pertinente à explorer afin de les mettre au service du développement durable.

RÉFÉRENCES

Beaudry, F., deMaynadier, P.G. and Hunter Jr., M.L. (2009). Seasonally Dynamic Habitat Use by Spotted and Blanding's Turtles in Maine. Journal of Herpetology, vol. 43, n° 4, p. 636-645.

Bertacchi, W. et Maisonneuve, C. (2011). Document préparatoire – 24e atelier sur la biodiversité. MRNF – Direction de l'expertise Faune-Forêts-Territoire du Bas-Saint-Laurent, 7 p.

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.

Congedo, L., Munafò, M. and Macchi, S. (2013). Investigating the Relationship between Land Cover and Vulnerability to Climate Change in Dar es Salaam. Working Paper, Rome: Sapienza University, 48 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.

Jensen, J.R. 2005. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Third Edition, University of South Carolina, 526 p.

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° 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° 3, p. 230-238.

Leonard, P.B., Baldwin, R.F., Homyack, J.A. and Wigley, T.B. (2012). Remote detection of small wetlands in the Atlantic coastal plan of North America Local relief models, ground validation, and high-throuput computing. Forest Ecology and Management, 284, 107-115.

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.

Quantum GIS Development Team (2009). Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.osgeo.org

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.

Commonwealth of Massachusetts (2014). Energy and Environmental Affairs: Disivion of Fisheries and Wildlife. En ligne. http://www.mass.gov/dfwele/dfw/nhesp/species_info/nhfacts/eubranchipus_intricatus.pdf. Consulté le 14 mars 2014.

Varin, M., Bournival, P., Duclos, I. et Fink, J. (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, 18 pages.

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.

Wu, Q., Lane, C. and Liu, H. (2014). An Effective Method for Detecting Potential Woodland Vernal Pools Using High-Resolution Lidar Data and Aerial Imagery. Remote Sensing, vol. 6, p. 11444-11467.